



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALLAN PEREIRA DE SOUZA
LUIZ ANTONIO SANTOS NERI

ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIATENSÃO EM PALMAS - TO

PALMAS-TO

2024

**ALLAN PEREIRA DE SOUZA
LUIZ ANTONIO SANTOS NERI**

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIATENSÃO EM PALMAS - TO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Me. Felipe Tozzi Bittencourt.

**PALMAS-TO
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

S719a Souza, Allan Pereira de
Análise dos Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica na
Rede de Distribuição de Média Tensão em Palmas - TO / Allan
Pereira de Souza, Luiz Antonio Santos Neri. – PALMAS, TO, 2024.
68 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, PALMAS, TO, 2024.

Orientador: Me. Felipe Tozzi Bittencourt

1. Geração Distribuída. 2. Geração Distribuída Fotovoltaica. 3.
Média Tensão. I. Neri, Luiz Antonio Santos. II. Tozzi Bittencourt,
Felipe III. , . IV. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

ALLAN PEREIRA DE SOUZA
LUIZ ANTONIO SANTOS NERI

ANÁLISE DOS IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA NA
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIATENSÃO EM PALMAS - TO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como cumprimento às exigências legais do currículo do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Aprovado em: 27/06/2024

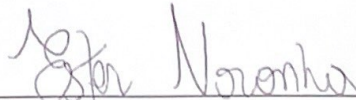
Banca Examinadora:



Prof. Me. Felipe Tozzi Bittencourt
Orientador



Prof. Dr. Fabio Lima de Albuquerque
Membro da Banca Examinadora



Ester Ágar Santos Noronha
Membro da Banca Examinadora

RESUMO

O Sistema Elétrico de Potência é impactado constantemente por mudanças, sendo elas, relacionadas às características construtivas da rede, características do perfil de consumo, assim como também características climáticas e ambientais, sendo de junho a setembro, meses mais quentes e com maior contribuição da geração distribuída (GD), e de dezembro a abril, meses mais chuvosos e com menor contribuição. É importante que essa mudança seja acompanhada de inovação, percepção e conscientização, e sobre o último, a GD emerge como um elemento transformador, e tem contribuído e ostentado um papel chave na diversificação da geração, deixando o mercado energético cada vez mais competitivo, limpo e renovável. Por outro lado, com a expansão é possível identificar que na rede de distribuição de média tensão há impactos que precisam ser observados e analisados. Este trabalho se propôs a avaliar, descrever e relatar tais impactos relacionados a GD na média tensão, com base em informações acadêmicas, e em dados coletados da concessionária local, para compreensão de alguns dos impactos oriundos de números reais de demanda líquida média do alimentador abordado, em determinados horários, e em determinadas épocas dos anos de 2018 a 2023.

Através dos dados obtidos, e das informações coletadas, foi possível identificar que a potência instalada através de módulos fotovoltaicos no alimentador estudado iniciou-se em 16 kW em 2018, e chegou a marca de 6,3 MW em 2023, e concomitante a isto, houve também a redução de carga (demanda líquida média) de tal alimentador, ao ser comparado os horários de 12 horas e 23 horas nos meses de julho entre 2018 e 2022, foi obtido uma diferença de demanda líquida média do alimentador nesses horários de 7,91% no ano de 2019, e finalizou com 62,07% em 2022.

Palavras-chave: Alimentador, Geração distribuída fotovoltaica, Geração distribuída, Impactos, Média tensão.

ABSTRACT

The Electric Power System is constantly impacted by changes related to the constructive characteristics of the network, the characteristics of the consumption profile, as well as climatic and environmental characteristics, with June to September being the hottest months with the greatest contribution from distributed generation (DG), and December to April being the rainiest months with the least contribution. It is important that this change is accompanied by innovation, perception and awareness, and with regard to the latter, DG has emerged as a transformative element, and has contributed and played a key role in diversifying generation, making the energy market increasingly competitive, clean and renewable. On the other hand, with the expansion it is possible to identify that there are impacts on the medium-voltage distribution network that need to be observed and analyzed. This work set out to evaluate, describe and report on these impacts related to medium-voltage DG, based on academic information and data collected from the local utility, in order to understand some of the impacts arising from real average net demand figures for the feeder in question, at certain times and in certain periods between 2018 and 2023.

Through the data obtained and the information collected, it was possible to identify that the power installed through photovoltaic modules on the feeder studied started at 16 kW in 2018, and reached the mark of 6.3 MW in 2023, and concomitantly with this, There was also a reduction in the load (average net demand) of this feeder. When comparing the hours of 12 p.m. and 11 p.m. in the months of July between 2018 and 2022, a difference was obtained in the average net demand of the feeder at these times of 7.91% in 2019, and ended with 62.07% in 2022.

Keywords: Distributed Generation, Feeder, Impacts, Medium Voltage, Photovoltaic Distributed Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira 2023	14
Figura 2 – Mapa de localização de Palmas	16
Figura 3 – Diagrama unifilar do SEP	20
Figura 4 – Subsistemas do SIN	23
Figura 5 – Esquema da geração distribuída em residências.....	34
Figura 6 – Esquema dos sistemas conectados à rede	35
Figura 7 – Esquema dos sistemas isolados da rede.....	36
Figura 8 – Subestações em Palmas - TO.....	42
Figura 9 – Curva da demanda líquida média por hora – Anual	45
Figura 10 – Curva de demanda líquida por hora – Média mensal 2023	46
Figura 11 – Curva da Geração Solar no Brasil – 07/06/2024	47
Figura 12 – Curva da Demanda líquida média – mensal de 2022.....	48
Figura 13 – Curva comparativa da Demanda líquida média entre 23h e 12h – mensal de 2022.....	49
Figura 14 – Curva de Carga do dia 02/01/2018.....	50
Figura 15 – FP ao decorrer do dia 02/01/2018.....	50
Figura 16 – Curva de Carga do dia 01/01/2023.....	51
Figura 17 – FP ao decorrer do dia 01/01/2023.....	52
Figura 18 – Curva da demanda líquida média – com/sem geração distribuída mês de julho	54
Figura 19 – Dados comparativos entre a demanda líquida média projetada e real - Anual.....	55
Figura 20 – Curva da demanda líquida média entre 23 horas e 12 horas – Anual..	56
Figura 21 – Comparativo entre curvas de carga do mês 04/2023	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fontes de Energia Utilizadas no Brasil em Operação.....	15
Tabela 2 – Crescimento de consumidores no alimentador - %	43
Tabela 3 – Quantidade de Conexões de GD no alimentador ao longo dos anos.....	44

LISTA DE ABREVIATÖES

ACL - Ambiente de Contratação Livre
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CCEE – Câmara de Comercializa o de Energia Elétrica
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica SA
CIGRE – Comitê Internacional de Produ o e Transmissão de Energia Elétrica
CONSERVE – Programa de Conserva o de Energia no Setor Industrial
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
GD – Gera o Distribuída
GT – Grupo de Trabalho
IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano
IRENA – Agência Internacional para as Energias Renováveis
ISSQN – Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza
ITBI – Imposto de Transferência de Bens Imóveis
MME – Ministério de Minas e Energia
MMGD – Microgera o e da Minigera o Distribuídas de Energia Elétrica
MT – Média Tensão
MUST – Montante do Uso do Sistema de Distribui o
ONS – Operador Nacional do Sistema
PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
PEE – Programa de Eficiência Energética
PERS – Programa de Energia Renovável Social
PNE – Plano Nacional de Energia
REN – Resolu o Normativa
SCEE – Sistema de Compens o de Energia Elétrica
SEP – Sistema Elétrico de Potência
SIN – Sistema Interligado Nacional
TE – Tarifa de Energia
TUSD – Tarifa do Uso do Sistema de Distribui o

TUSD C – Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição para Consumo

TUSD G – Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição para Geração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.2	OBJETIVO GERAL.....	19
1.3.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA - SEP	20
2.1.1.	DEFINIÇÕES.....	20
2.1.2	CONTEXTO HISTÓRICO.....	22
2.1.3	SIN – SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL	23
2.1.4	ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA.....	24
2.1.5	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	25
2.1.6	TRANSMISSÃO E SUBTRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	26
2.1.7	DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	27
2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	28
2.2.2	DEFINIÇÕES.....	28
2.2.3	CONTEXTO HISTÓRICO.....	29
2.2.4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA	33
2.2.5	IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA MÉDIA TENSÃO	37
2.2.6	USO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	38
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	40
3.1	TIPO DE PESQUISA	40
3.2	COLETA DE DADOS	40
3.3	TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	40
4	ESTUDO DE CASO.....	41
4.1	CONCESSIONÁRIA LOCAL.....	41
4.2	LOCAL DE ESTUDO	42
4.3	CARACTERÍSTICAS DO ALIMENTADOR DO ESTUDO	43
4.4	ASPECTOS TÉCNICOS	46
4.4.1	FLUTUAÇÃO DA GERAÇÃO.....	46

4.4.2	CONTROLE DE TENSÃO	49
4.4.3	DIMINUIÇÃO DE PERDAS	53
4.4.4	REDUÇÃO DE CARGA	53
4.4.5	FLUXO REVERSO	56
5	CONCLUSÃO.....	59
6	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A Geração Distribuída (GD) refere-se à produção de eletricidade realizada em proximidade ou diretamente nos locais de consumo, independentemente da tecnologia ou fonte de energia utilizada, sendo a mesma caracterizada por não ser despachada de forma centralizada (MALFA, 2002).

A GD pode ser proveniente de diversas fontes de energia alternativas, sendo que com a queda dos preços de placas solares e inversores tem sido incentivo para a aquisição da geração distribuída fotovoltaica. Dentre os principais benefícios, se destaca como uma opção de energia limpa, de instalação relativamente simples e é capaz de reduzir a dependência do mercado de fontes não renováveis (HOSENUZZAMAN et al., 2014).

Ao longo dos últimos anos, à medida que as condições climáticas se deterioraram constantemente devido a fatores como o uso contínuo de combustíveis fósseis, tornou-se evidente a necessidade de unir esforços para reduzir as emissões de carbono e proteger os recursos naturais, sendo que, para enfrentar esse desafio foram realizadas reuniões com a participação de representantes de diversos países, com o objetivo de estabelecer a adoção de políticas ambientais mais rigorosas (PETERS; HERTWICH, 2007).

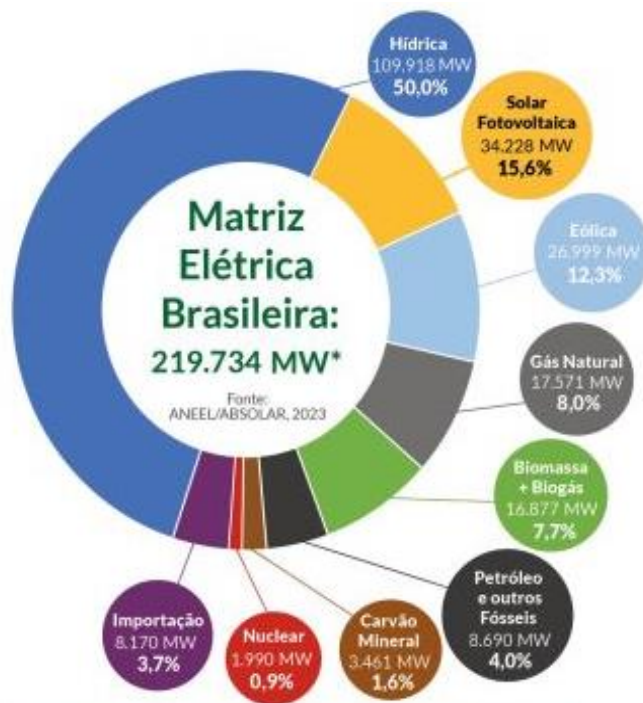
Nesse contexto, a necessidade de avançar em termos de tecnologia tornou-se essencial para priorizar soluções mais eficientes diante das demandas da sociedade. No que diz respeito às fontes de energia, o setor elétrico tem testemunhado, ao longo dos últimos anos, um aumento significativo na integração de fontes alternativas e renováveis nos sistemas de distribuição de energia elétrica. No entanto, à medida que essas tecnologias avançam, é crucial que o sistema esteja preparado para enfrentar os possíveis impactos resultantes dessa implantação (SANTOS, 2014).

A disponibilidade de energia elétrica traz consigo um aumento significativo na qualidade de vida da sociedade, sendo que quando um sistema de distribuição de energia é implantado em uma determinada região, a população daquele local imediatamente inicia o desfrute de vários benefícios, incluindo um maior conforto em suas residências e melhores oportunidades de emprego e produção. Mas, à medida que as pessoas se acostumam com os benefícios proporcionados pela energia elétrica em seu cotidiano, surgem discussões sobre a qualidade desse serviço. A

principal preocupação é garantir a continuidade do fornecimento, pois qualquer interrupção na energia pode resultar em transtornos de diversas naturezas (MEHL, 2012).

A composição das fontes de energia de um país, conhecida como matriz energética, é determinada pela disponibilidade total de recursos energéticos. Essa informação é essencial para o planejamento do setor elétrico, pois assegura a eficiência na produção e no consumo de energia, possibilitando uma abordagem estratégica na gestão, com foco na sustentabilidade e na segurança energética (CIMA, 2006). Além disso, conforme ilustrado na FIGURA 1, a matriz elétrica, que é uma parte crucial da matriz energética, especificamente trata da composição das fontes de energia utilizadas para gerar eletricidade em um país, desempenhando um papel fundamental na garantia do fornecimento estável de energia elétrica para a população e para a economia.

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira 2023



Fonte: ABSOLAR (2023)

É notória a participação positiva do Brasil na matriz elétrica mundial, em que há uma grande predominância de fontes renováveis em sua matriz elétrica, ou seja, significa que a geração de energia elétrica no país é predominantemente obtida a

partir de fontes que se renovam naturalmente, resultando em custos operacionais mais baixos e emissões reduzidas de gases poluentes no ar.

A TABELA 1 apresenta um comparativo em que há as participações das principais fontes de geração em operação no Brasil nos anos de 2020 e 2023, e no que diz respeito a esse território nacional há uma constituição majoritária por fontes renováveis, onde as hidrelétricas eram responsáveis pela produção mais expressiva de energia, devido a sua confiabilidade, competitividade econômica e abundância no cenário nacional. Mas no ano de 2023 é possível perceber um aumento acentuado no investimento em usinas fotovoltaicas, podendo ser devido suas vantagens ambientais e econômicas.

Tabela 1 – Fontes de Energia Utilizadas no Brasil em Operação

Origem	2020			2023		
	Qtd	Potência (kW)	%	Qtd	Potência (kW)	%
UHE	1.272,00	109.258.143,00	61,53	1.325,00	109.883.342,00	48,86
UTE	2.898,00	40.664.031,00	22,90	3.031,00	46.174.863,00	20,53
EOL	681,00	17.182.716,00	9,68	1.008,00	28.996.651,00	12,89
GD	407.791,00	5.161.931,36	2,91	2.352.999,00	26.581.111,52	11,70
UFV	4.187,00	2.940.360,00	1,87	16.662,00	11.509.457,00	5,12
UTN	2,00	1.990.000,00	1,12	2,00	1.990.000,00	0,88
TOTAL	416.831,00	177.581.281,36	100	2.375.027,00	200.143.764,59	100

Fonte: Banco de Informações de Geração, 2023

Entretanto, esse cenário muda significativamente ao se tratar da matriz elétrica global, que é composta em sua maioria por fontes não renováveis, onde há um domínio dos usos de carvão mineral e gás natural (EPE, 2023).

Tendo em vista essa problemática, e sabendo que a GD pode ser adotada em larga escala devido os seus benefícios, este trabalho propõe estudar os impactos que poderão ser causados às redes de energia elétrica, com ênfase nas redes de média tensão.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A pesquisa tem como foco a cidade de Palmas, que foi fundada em 1989 e é notável por ser a última cidade planejada do Brasil. Devido à sua localização privilegiada e por ser situada em uma localização estratégica, Palmas (FIGURA 2) desempenha o papel de uma conexão fundamental entre a região Norte do país e as demais regiões (ABREU, 2020).

Figura 2 – Mapa de localização de Palmas



Fonte: ResearchGate (2023)

Palmas, como é exibido na FIGURA 2, desempenha um papel crucial como um ponto de ligação entre a região central do Brasil e as diversas capitais das regiões Norte, Nordeste, Centro e Sul do país. Essa localização estratégica confere à cidade uma importância notável em termos de geografia, geopolítica, aspectos socioeconômicos, desenvolvimento urbano e preservação ecológica, uma vez que Palmas está situada dentro da área designada como Amazônia Legal (NOGUEIRA, 2017).

A crescente preocupação com a sustentabilidade nas áreas urbanas está incentivando as pessoas a procurar fontes de energia alternativas que não apenas permitam economizar recursos, mas também sejam ambientalmente amigáveis (ANEEL, 2015). Nesse contexto, a energia solar se destaca como uma opção viável,

onde o Brasil se encontra entre os países com maior potencial de aproveitamento da energia solar, com uma variação de 1500-2500 kWh/m²/ano de radiação solar incidente em quase todo o seu território (PEREIRA et al, 2017).

Já o município de Palmas, a capital do estado de Tocantins, merece destaque, pois sua irradiação solar é aproximadamente o dobro daquela da Alemanha, um país reconhecido por sua capacidade significativa de geração de energia fotovoltaica (CARLOS, 2018), o que demonstra um aproveitamento precário da irradiação recebida em toda a extensão territorial do estado.

Seguindo na mesma perspectiva, desde 2016, a cidade de Palmas, no estado de Tocantins, implementou o Programa Palmas Solar, demonstrando como a geração de energia solar pode ser uma poderosa ferramenta para aproveitar a rica disponibilidade de radiação solar, ao mesmo tempo em que impulsiona o desenvolvimento econômico local.

O Programa Palmas Solar foi estabelecido por meio da Lei Complementar nº 327, conhecida como a Lei Palmas Solar (PALMAS, 2015), e posteriormente regulamentada pelo Decreto Municipal nº 1.220 (PALMAS, 2016). Sob a adoção desse programa, os residentes, empresas e indústrias que optam por instalar sistemas de energia solar recebem incentivos fiscais da prefeitura. Esses incluem descontos que podem chegar a até 80% no Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU), no Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza (ISSQN) e no Imposto de Transferência de Bens Imóveis (ITBI) (PALMAS, 2016).

O Programa Palmas Solar se concentra em abordar questões ambientais essenciais, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, a preservação de áreas degradadas e o estímulo à indústria local de fabricantes de tecnologias fotovoltaicas, além de promover uma redução nas despesas com energia elétrica e minimizar os impactos ambientais negativos. Ou seja, em resumo o programa visa não apenas a economia de energia, mas também a promoção da sustentabilidade, do desenvolvimento econômico e da tecnologia solar na região.

Adicionalmente, a concessionária de energia local realizou investimentos substanciais na melhoria da infraestrutura elétrica do estado. Em Palmas, a cidade conta com uma rede abrangendo mais de 7 mil quilômetros, e conectada a 5 subestações e 37 alimentadores. Essa infraestrutura garante um fornecimento de

energia seguro e confiável para os mais de 126 mil clientes da região (AF Notícias, 2021).

O desafio central do trabalho de pesquisa na área de geração distribuída reside na compreensão dos obstáculos e das vantagens associadas à implementação eficaz e à integração harmoniosa nos sistemas elétricos. Nessa abordagem, surge a indagação sobre como as redes de distribuição elétrica poderão lidar com a absorção de níveis substanciais e quais serão os impactos deste comportamento tanto na estrutura física da rede quanto na qualidade da energia elétrica.

Embora a introdução tenha benefícios para a matriz elétrica, ela também carrega consigo a possibilidade de desafios concernentes à operação da rede, capazes de gerar efeitos indesejados. Além disso, a incorporação de fontes de energia adicionais intensificam a complexidade do sistema, uma vez que a conexão de tais fontes pode resultar em sobrecargas do sistema e perturbações no equilíbrio entre a oferta e a demanda dos serviços oferecidos pelas empresas de distribuição.

A exploração detalhada dessa problemática de pesquisa pode contribuir de forma significativa para o desenvolvimento de soluções que assegurem o funcionamento eficiente e confiável das redes elétricas, abrindo caminho para uma implementação bem-sucedida, com todos os seus benefícios e potencialidades, sem comprometer a estabilidade e a qualidade do sistema elétrico como um todo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante do aumento da contribuição da GD intermitente na matriz energética do país, este trabalho se propõe na necessidade de compreender os desafios e as oportunidades relacionados à implementação e integração eficiente nos sistemas elétricos, visando entender como o sistema se comporta perante a quantidade excessiva de inserção e os efeitos de tal comportamento na parte física da rede. Pontos estes que são vitais e têm influência direta na qualidade de energia elétrica nos Sistemas Elétricos de Potência.

1.3 OBJETIVOS

1.3.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar como a integração em larga escala da geração fotovoltaica intermitente nas operações diárias afeta as redes de distribuição de média tensão em termos de operação, desempenho e estabilidade.

1.3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analisar como a geração distribuída fotovoltaica influencia a qualidade da energia fornecida, considerando aspectos como variações de tensão e frequência nas redes de média tensão.
2. Analisar o perfil de crescimento da geração distribuída fotovoltaica na região de estudo ao longo dos últimos anos.
3. Investigar como a geração distribuída fotovoltaica pode contribuir para a redução das perdas de energia nas redes de distribuição de média tensão, especialmente em áreas com alta penetração de geração.
4. Avaliar os efeitos da geração distribuída fotovoltaica no fluxo de carga e na sobrecarga das linhas e equipamentos da rede de média tensão.

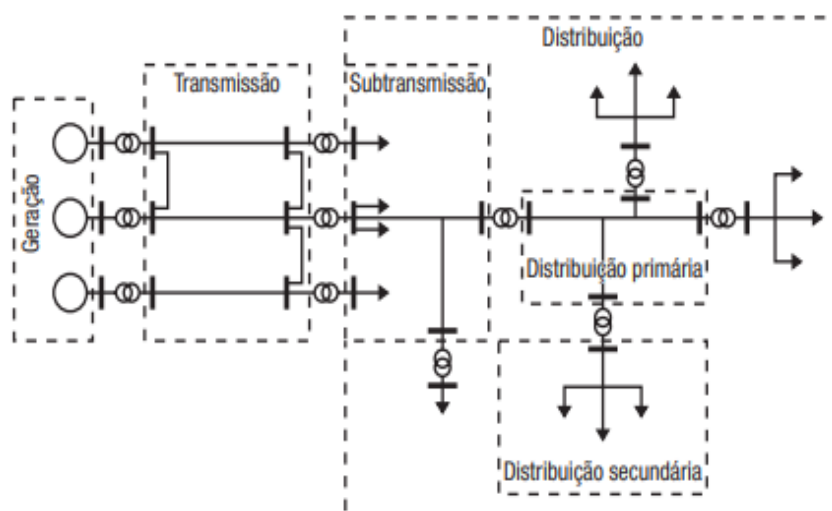
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA - SEP

2.1.1. DEFINIÇÕES

O propósito primordial do Sistema Elétrico de Potência - SEP é garantir o fornecimento seguro e de alta qualidade de energia elétrica a uma ampla variedade de usuários, independentemente do tamanho de suas necessidades. Para alcançar isso, o SEP é composto por três principais fases distintas: geração, transmissão e distribuição. Essas etapas colaboram para converter diferentes formas de energia e, posteriormente, distribuí-las aos consumidores (KAGAN et al., 2005). A FIGURA 3 representa a organização do SEP, contendo as suas subdivisões.

Figura 3 – Diagrama unifilar do SEP



Fonte: KAGAN et al. (2005)

A transformação de recursos naturais em energia elétrica se desenrola na etapa de geração. Normalmente, as usinas hidrelétricas em que há uma maior predominância no Brasil, têm um papel central na criação de eletricidade por meio da rotação de turbinas, as quais são impulsionadas pela força de uma grande quantidade de água armazenada em represas, assim gerando a energia que é então convertida em eletricidade por meio dos geradores elétricos.

Após esse estágio, no ponto onde a geração se encontra com a transmissão, uma subestação de elevação de tensão é utilizada para aumentar os níveis de tensão

a valores adequados para uma eficaz condução da eletricidade e para reduzir ao mínimo as perdas. A seleção da tensão é determinada de acordo com a distância que a eletricidade precisa percorrer e a quantidade de energia a ser transportada, sendo que a transferência de energia entre regiões ocorre normalmente em corrente alternada e em níveis de tensão elevados que vão de 230 kV até 800 kV (sendo a de 800 kV a linha de transmissão “Belo Monte”, que tem sua extensão no Tocantins, de forma parcial), e em corrente contínua, de 600 kV, como por exemplo, o sistema de Itaipu (SILVA, 2013).

Na fase que marca a transição entre a transmissão e a distribuição, através de uma subestação de redução, a tensão é diminuída pela primeira vez, resultando em um nível de tensão de subtransmissão, correspondente entre 69 kV e 138 kV (MUZY, 2012).

Na etapa de subtransmissão, a energia é fornecida a determinados consumidores, tais como indústrias automobilísticas, e é encaminhada para as subestações de distribuição primária. Nestas subestações, ocorre uma segunda diminuição da tensão para alcançar a distribuição primária ou níveis médios de tensão (13,8kV, 20kV ou 34,5kV), sendo que nesse nível, a energia é direcionada aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição, que reduzem a tensão para a distribuição secundária (127/220V, 220/380V e 220/440V, sendo o último, o atendimento na zona rural), concretizando o suprimento de energia para consumidores que incluem residências e estabelecimentos comerciais (SILVA, 2013).

No contexto brasileiro, as estruturas elétricas formam um sistema intrincado cuja finalidade é efetuar o transporte da energia desde suas origens de produção até os pontos de consumo. Dentro dessa infraestrutura estão incluídas as unidades de geração, subestações, os cabos de transmissão, as redes de distribuição e, por fim, os indivíduos ou entidades que consomem a eletricidade (MENEZES, 2015).

Devido às extensas proporções geográficas do Brasil e à separação entre as unidades de geração de energia, em sua maioria hidrelétricas, e os centros onde a eletricidade é consumida, a relevância das redes de transmissão e distribuição é notável. Essa relevância emerge pelo fato de que os principais usuários de energia elétrica estão localizados em áreas urbanas e regiões industriais, e é nesses locais que as redes de distribuição e transmissão desempenham um papel fundamental (MENEZES, 2015).

Dentro dessa situação, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) possui uma missão central: produzir, transmitir e distribuir eletricidade de acordo com normas estabelecidas de confiabilidade, disponibilidade, excelência, segurança e eficiência financeira. Essa operação é executada com um compromisso sólido de minimizar os efeitos adversos sobre o meio ambiente e garantir a máxima segurança das pessoas envolvidas (LEÃO, 2009).

2.1.2 CONTEXTO HISTÓRICO

O debate global sobre a eficiência no uso da energia começou a ganhar força durante a segunda metade do século XX. As crises do petróleo na década de 70 foram eventos significativos que marcaram as primeiras grandes preocupações sobre o fornecimento de energia, levando muitos países a reavaliar suas fontes de energia (MIRANDA, 2023).

A partir desse ponto, as nações industrializadas passaram a implementar iniciativas e políticas direcionadas para essa questão. Isso se deu porque houve uma transformação significativa no caminho do desenvolvimento tecnológico da sociedade industrial, orientando-se cada vez mais para inovações que economizam energia (FURTADO, 1994).

O Brasil, por sua vez, em 1981 deu um importante salto em direção à eficiência energética com a introdução do Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial, conhecido como CONSERVE, programa esse que tinha um foco específico na indústria e tinha como objetivo incentivar a economia de energia nesse setor, ao mesmo tempo em que promovia o uso de produtos eficientes e fontes de energia nacionais (MME, 2011).

No entanto, o programa CONSERVE enfrentou desafios internos e foi afetado pela crise econômica dos anos 80, fazendo com que o programa visasse mais na substituição de fontes de energia, o que prejudicou a sua principal diretriz de conservação de energia. Além disso, devido à burocracia que permeou os processos durante o período de recessão entre 1981 e 1985, houve um subaproveitamento dos recursos destinados ao programa. Contudo, tal programa desempenhou um papel importante ao sinalizar ao governo a necessidade de uma posição mais clara em relação às políticas econômicas e energéticas (MME; EPE, 2007).

Visando o futuro da gestão energética, em 2007 a EPE lançou o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) que, segundo ele, visava o planejamento a longo prazo no setor de energia além da evolução da demanda total de energéticos, possibilitando cálculos de eficiência energética no país durante o período. Projeções do PNE demonstram que as edificações devem contribuir nos próximos anos cerca de 60% dos ganhos totais de eficiência elétrica, enquanto o setor industrial deve ser responsável por quase 40% (ELETROBRAS, 2020a).

2.1.3 SIN – SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

O Sistema Interligado Nacional representa o sistema de geração e transmissão de energia elétrica do Brasil. Este sistema é uma rede complexa que integra diversas usinas de grande escala e múltiplos proprietários. A partir da FIGURA 4, é possível identificar a subdivisão em quatro subsistemas geográficos: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2018).

Figura 4 – Subsistemas do SIN



Fonte: Adaptado de Saidel (2017)

A conexão dos sistemas elétricos, facilitada pela rede de transmissão, possibilita a transferência de energia entre diferentes subsistemas. Isso resulta em benefícios sinérgicos e aproveita as variações nos níveis de água das bacias hidrográficas. A combinação dos recursos de geração e transmissão permite a prestação de serviços de energia ao mercado de forma segura e eficiente (ONS, 2018).

Segundo a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG, s.d.), devido às vastas extensões territoriais do Brasil, as condições hidrológicas variam consideravelmente de uma região para outra, resultando em diferentes períodos de seca e de chuvas que não se alinham. Para fazer uso eficiente dessa diversidade e reduzir os riscos de possíveis interrupções no fornecimento de energia, o sistema elétrico nacional é projetado de forma interligada. Isso significa que o sistema conta com uma rede de linhas de transmissão que permitem a transferência de energia entre diferentes regiões do país.

Também conforme a CEMIG (s.d.), com o objetivo de garantir o funcionamento eficiente e otimizado desse sistema interligado, foi estabelecido o Operador Nacional do Sistema (ONS). Este órgão desempenha o papel de coordenar e supervisionar todas as operações dos reservatórios de energia de maneira centralizada. O foco é produzir eletricidade de forma economicamente viável, ao mesmo tempo em que assegura a máxima confiabilidade no abastecimento de energia para todo o país.

A capacidade de geração elétrica instalada no Sistema Interligado Nacional é predominantemente composta por usinas hidrelétricas localizadas em dezesseis bacias hidrográficas em várias partes do Brasil. Recentemente, houve um notável aumento na instalação de usinas eólicas, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, o que elevou a relevância dessa forma de geração no fornecimento de energia para o mercado (PUCRIO, 2007).

As usinas térmicas de reserva, que geralmente utilizam combustíveis fósseis e estão localizadas próximas dos principais centros de consumo, desempenham um papel estratégico importante, pois contribuem para a segurança do Sistema Interligado Nacional (SIN). Essas usinas são ativadas com base nas condições atuais dos recursos hídricos, permitindo a administração dos níveis de água armazenados nos reservatórios das usinas hidrelétricas para garantir o abastecimento futuro. Os sistemas de transmissão conectam diversas fontes de geração de energia e possibilitam o fornecimento de eletricidade ao mercado consumidor (ONS, 2018).

2.1.4 ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é a entidade encarregada de coordenar e supervisionar a operação das usinas de geração e das redes de transmissão de energia elétrica em todo o Sistema Interligado Nacional (SIN), além

de planejar a operação dos sistemas de energia isolados do país. Isso é feito sob a supervisão e regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo estabelecido como uma organização jurídica de direito privado, atuando como uma associação civil sem fins lucrativos. Sua criação ocorreu em 26 de agosto de 1998, conforme estipulado pela Lei nº 9.648, com modificações posteriores introduzidas pela Lei nº 10.848/2004, e sua regulamentação é regida pelo Decreto nº 5.081/2004 (ONS, 2023).

Para desempenhar suas funções legais e cumprir sua missão institucional, o Operador Nacional do Sistema Elétrico realiza uma variedade de estudos e implementa ações que envolvem o sistema elétrico e os diversos agentes responsáveis por ele. Isso é feito com o propósito de gerenciar as diversas fontes de energia e a rede de transmissão, assegurando assim a confiabilidade do fornecimento de eletricidade em todo o país.

Os principais objetivos de atuação, de acordo com o ONS (2023), são: melhorar a eficiência na operação do sistema elétrico, com o objetivo de reduzir os custos gerais, ao mesmo tempo em que atende aos padrões técnicos e critérios de confiabilidade estabelecidos nos Procedimentos de Rede aprovados pela agência reguladora; assegurar que todos os participantes do setor elétrico possam usar a rede de transmissão de maneira justa e igualitária; e contribuir considerando as características de suas operações, para que o crescimento do SIN seja realizado com custos mínimos e busque as melhores condições operacionais no futuro.

2.1.5 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A etapa de geração no Sistema Elétrico de Potência (SEP) é o processo de produção de eletricidade a partir de diversas fontes primárias de energia. Essas fontes podem variar, entretanto, cada uma delas converte sua energia específica e tem suas características particulares que afetam o processo de geração de eletricidade (BARROS et al., 2014).

Enquanto a geração hidráulica envolve o uso do fluxo de água, geralmente de rios represados por barragens, para movimentar turbinas que, por sua vez, acionam geradores elétricos, a térmica utilizada de usinas que queimam combustíveis fósseis, já a eólica aproveita a energia cinética do vento para fazer girar turbinas que acionam geradores (BARROS et al., 2014).

Se tratando da energia nuclear, envolve a fissão de átomos em reações nucleares controladas. Por fim, a solar converte a energia solar em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos que capturam a luz solar e a transformam em corrente elétrica (PINTO, 2013).

No processo de geração de energia tem-se uma tensão alternada em uma frequência fixa e amplitude variável conforme a necessidade de atendimento (LEÃO, 2009).

A presença de várias fontes de geração confere ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) a flexibilidade necessária para se ajustar às diversas condições climáticas, à disponibilidade de recursos e à demanda de energia. A escolha da fonte a ser utilizada depende de fatores como a disponibilidade dos recursos, os custos envolvidos, os impactos ambientais e as considerações de segurança. Independentemente da fonte de energia, as usinas de geração têm um papel crítico no fornecimento de eletricidade à sociedade, alimentando todas as facetas da vida moderna (PINTO, 2013).

As formas de geração de energia existentes eram centralizadas e despachadas, pois não estavam localizadas perto dos grandes centros de carga. Isso significa que a geração era conectada à transmissão e distribuída pelas outras etapas do sistema elétrico de potência. No entanto, com a difusão da GD, agora existem conexões feitas nos sistemas de distribuição, o que trouxe benefícios, mas também novos desafios para manter a qualidade na operação dos sistemas (VAN HAAREN, 2014).

2.1.6 TRANSMISSÃO E SUBTRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A rede de transmissão é responsável por transportar grandes quantidades de eletricidade em grandes distâncias até as áreas de demanda. A eficiência e capacidade dessa rede influenciam a transferência de energia e a redução de perdas durante a transmissão, sendo que seus níveis de tensão variam entre 138 e 750 kV (PINTO, 2013).

Essa etapa é vital para garantir que a energia seja distribuída eficientemente por todo o sistema elétrico, permitindo que as regiões com excedentes de geração possam suprir as regiões que necessitam de mais energia (BARROS et al., 2014).

A transmissão envolve uma rede de linhas de alta tensão, torres, subestações e equipamentos associados, desempenhando um papel crucial na garantia da confiabilidade e estabilidade do sistema elétrico. A operação eficaz da rede de

transmissão é essencial para garantir que a energia elétrica chegue aos consumidores de maneira segura e confiável (BARROS et al., 2014).

Todavia, já os sistemas de subtransmissão são empregados para transportar energia elétrica para grandes consumidores. A tensão que define uma subtransmissão pode variar de acordo com a região, e um mesmo valor pode ser classificado como subtransmissão em um local e transmissão em outro. No Brasil, as linhas de 69 kV são geralmente consideradas como subtransmissão, variando entre 34,5 e 69 kV (PINTO, 2013).

2.1.7 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A fase de distribuição no Sistema Elétrico de Potência (SEP) desempenha um papel fundamental ao transportar a eletricidade produzida nas usinas de geração e transmitida pelas redes de transmissão até os consumidores finais, que podem incluir residências, empresas, indústrias e outras instalações. Essa etapa é de extrema importância para garantir que a energia elétrica seja entregue de forma segura, confiável e eficiente aos locais onde é necessária, atendendo às demandas diárias das pessoas e das atividades econômicas, sendo que a qualidade da distribuição afeta diretamente a estabilidade da tensão e a continuidade do fornecimento (KAGAN et al., 2005).

A distribuição envolve uma rede de média e baixa tensão composta por linhas, transformadores, subestações de distribuição e equipamentos relacionados. Sendo, as linhas de distribuição responsáveis por transportar a eletricidade em média e baixa tensão para as áreas urbanas e rurais, os trafos para reduzir a tensão para níveis seguros para uso doméstico e comercial e as subestações com a função de dividir a eletricidade em diferentes circuitos que atendem áreas específicas (SILVA, 2013).

A etapa de distribuição representa a última conexão entre os sistemas elétricos e os consumidores. Ela tem a responsabilidade de disponibilizar energia elétrica para atender a uma ampla gama de necessidades, que vão desde a iluminação residencial até a operação de instalações industriais complexas. Assegurar que essa fase funcione de forma confiável e eficiente é de suma importância para manter um fornecimento estável de eletricidade para a sociedade (KAGAN et al., 2005).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.2.2 DEFINIÇÕES

A geração distribuída é uma modalidade de geração de energia elétrica que se caracteriza pela proximidade dos geradores com os consumidores. Ela corresponde a um modelo de geração descentralizada, que emprega geradores de pequeno porte e se contrapõe à estratégia de geração centralizada.

De acordo com a ANEEL (2012), desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada, podendo até mesmo fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, para posterior compensação do consumo de energia verificado. Trata-se da Microgeração e da Minigeração Distribuída de Energia Elétrica – MMGD e do Sistema de Compensação de Energia Elétrica – SCEE, inovações que aliam economia financeira, consciência socioambiental e sustentabilidade.

Segundo Malfa (2002), para o Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - CIGRE a GD não é planejada de modo centralizado, nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizada. Para Turkson & Wohlgemuth (2001), ela se trata do uso de módulos de pequeno porte que são utilizados por concessionárias e consumidores para beneficiar o sistema elétrico ou consumidores específicos. Já para o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos – IEEE, a GD é uma central de geração pequena o suficiente para estar conectada à rede de distribuição e próxima do consumidor (MALFA, 2002).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2015), a partir da resolução nº 687/2015, A Microgeração Distribuída (MMGD) é caracterizada como tal quando sua capacidade instalada não excede 75 quilowatts (kW), enquanto a Minigeração Distribuída é aquela que possui uma capacidade superior a 75 kW, mas não ultrapassa 3 MW (podendo alcançar até 5 MW em circunstâncias específicas). Ambas são conectadas à rede de distribuição por meio de instalações em unidades de consumo. O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) permite, por exemplo, que o excedente de energia produzido por um sistema de MMGD

fotovoltaico seja injetado na rede e, posteriormente, à noite, a rede fornece energia de volta para a unidade de consumo, suprimindo necessidades adicionais.

Essas definições destacam a natureza descentralizada, no qual essa geração de eletricidade ocorre em locais próximos aos consumidores e pode ser usada de várias maneiras, seja para benefício da rede elétrica como um todo ou para atender às necessidades específicas de consumidores individuais.

2.2.3 CONTEXTO HISTÓRICO

A geração distribuída já ocorreu no passado, principalmente no Brasil, quando a energia demandada pelas indústrias era produzida localmente por volta da década de 1940. Todavia, a geração em grandes centrais se tornou mais barata e o interesse do consumidor em GD diminuiu. No entanto, o modelo de geração centralizada tem problemas como o aumento do custo da energia e perdas devido à distância, além da dependência brasileira da energia produzida em usinas hidrelétricas. A GD faz a diferença ao evitar essa centralização e dependência (MEGAWHAT, 2022).

Para a lei brasileira, ela foi definida inicialmente por meio do Decreto N° 5.163 de 30 de julho de 2004, exposta da seguinte forma em seu artigo 14:

“Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. *Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do **caput**.” (BRASIL, 2004, p. 6).*

No Brasil, devido à dificuldade de transmitir eletricidade por longas distâncias até áreas urbanas densamente habitadas - especialmente porque a maior parte da capacidade de geração hidrelétrica restante está localizada na região da Amazônia -

e devido a restrições à construção de usinas com grandes reservatórios devido a preocupações ambientais e sociais, o país optou por diversificar sua fonte de energia, sendo que entre as atitudes está um aumento no uso de gás natural e um incentivo à expansão das energias renováveis (MOREIRA, 2021).

Algum tempo depois, foi promulgada a Resolução Normativa nº 482/2012, com o intuito de estabelecer as condições gerais para a conexão de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, essa resolução introduziu o sistema de compensação de energia elétrica e tratou de outras questões relacionadas ao assunto (ANEEL, 2012). Antes da criação desta resolução, não existia um mecanismo formal de compensação de créditos, o que significa que a eletricidade ativa gerada por uma unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída não podia ser utilizada para compensar o consumo de eletricidade ativa.

Ao seguir a cronologia, a revisão mais significativa da REN 482/2012 ocorreu com a emissão da Resolução Normativa nº 687/2015. Esta trouxe avanços significativos para o desenvolvimento da geração distribuída, uma vez que definiu claramente os conceitos de microgeração distribuída, minigeração distribuída e o sistema de compensação. No seu Artigo 1º, esses termos foram definidos como:

“I - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;” (ANEEL, 2015, p. 1).

Através da portaria MME nº 538/2015, foi instituído um grupo de trabalho composto por representantes do Ministério de Minas e Energia – MME, Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, com o intuito de atender às diretrizes estabelecidas nesta portaria. Entre elas estão incluídas a promoção do crescimento da geração distribuída de energia elétrica, principalmente a partir de fontes renováveis e cogeração (MME, 2015).

Ainda em 2015, por meio da mesma portaria, o MME acenou com a possibilidade de evoluir do sistema de compensação de energia injetada na rede para o sistema de venda de energia, com possibilidade de financiamento e subsídios para a compra de equipamentos de GD, especificando que o GT deveria conduzir um estudo sobre um mecanismo simplificado para a comercialização de energia gerada por sistemas de geração distribuída no Ambiente de Contratação Livre (ACL) (MME, 2018).

Face à crise hídrica em curso e à redução dos níveis de água armazenada nos reservatórios, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) introduziu várias medidas operacionais. O objetivo primordial dessas ações era assegurar o abastecimento confiável de energia elétrica, minimizando ao máximo os impactos econômicos. Entre as medidas incluíram estratégias como a recuperação dos reservatórios nas áreas de nascentes, a otimização da transferência de energia entre diferentes regiões, o aumento do uso de usinas termelétricas e a flexibilização das restrições relacionadas ao uso da água para múltiplos fins (ONS, 2015).

No entanto, o uso das termelétricas para atender à demanda de energia resultou em custos mais elevados em comparação com a geração feita pelas usinas hidrelétricas. O aumento nos custos foi tão notável que, no mesmo ano, foi implementado o sistema de bandeiras tarifárias. Esse sistema foi criado para informar ao consumidor o custo real da geração de energia quando ele a está consumindo, permitindo-lhe ajustar seu consumo, caso deseje fazê-lo (ANEEL, 2022b).

Diante dessa nova realidade, tais fatores influenciaram em uma significativa elevação na demanda pelo mercado de micro e minigeração. Isso ocorreu devido à expectativa de que o período de recuperação do investimento fosse reduzido, considerando o aumento das tarifas de energia e a diminuição dos custos associados à instalação desses sistemas.

No final de 2015, a Resolução nº 482/2012 da ANEEL passou por uma atualização significativa, com as novas regras entrando em vigor em 1º de março de 2016. As principais mudanças incluíram: definições de potência, prazo de validade dos créditos, autoconsumo remoto, geração distribuída em condomínios e geração compartilhada (ANEEL, 2015).

Essas mudanças na regulamentação da ANEEL buscaram tornar a GD mais acessível e flexível, incentivando o uso de fontes de energia renovável e promovendo a economia de energia. Elas também abriram novas oportunidades para o compartilhamento de energia entre consumidores e a criação de consórcios.

Atualmente, não é mais vista como uma alternativa futura para o fornecimento de energia, mas sim como uma realidade presente. Esse cenário é particularmente evidente na geração de eletricidade por meio da energia solar fotovoltaica. O Brasil, embora tenha adotado essa abordagem de forma um pouco mais tardia em comparação a outros países, experimentou um crescimento exponencial desde a regulamentação estabelecida pela ANEEL em 2012.

Em todo o mundo, a adoção da GD como uma alternativa à geração centralizada está crescendo rapidamente. Segundo dados da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), em 2021 eram 3,37 TW de renováveis no mundo, sendo cerca de 1,04 TW advindos da geração solar (IRENA, 2023).

No Brasil, conforme indicado no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), a capacidade de GD instalada até 2019 superou 1,3 GW. De acordo com as projeções, esperava-se que esse número atingisse 11,4 GW até 2029. A expansão significativa deve ocorrer, sobretudo, no setor industrial, onde estão emergindo opções cada vez mais acessíveis para a implementação de projetos (BRASÍLIA, 2020).

Entretanto, conforme apontado no Relatório de Geração Distribuída desenvolvido pela ANEEL, essa geração já se encontra na casa dos 24,16 GW de potência instalada, sendo 23,9 GW advindos da radiação solar (ANEEL, 2023).

O país está passando por uma transformação significativa em seu setor elétrico, migrando de um sistema centralizado, onde a geração de energia ocorre em grandes usinas afastadas dos centros urbanos, para um modelo descentralizado e mais próximo dos locais de consumo de energia. Isso caracteriza a geração distribuída, que desempenha um papel fundamental na diversificação da matriz energética e na promoção da sustentabilidade no setor de energia elétrica do Brasil.

2.2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA

A geração distribuída é um conceito amplo que se refere à produção de energia elétrica em pequena escala, próxima ao local de consumo. Por sua vez, a energia solar fotovoltaica é o resultado da transformação direta da luz em eletricidade, um fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. Esse efeito, descoberto por Edmond Becquerel em 1839, ocorre quando a luz é absorvida por um material semicondutor, gerando uma diferença de potencial nas extremidades desse material. A célula fotovoltaica é a peça fundamental desse processo de conversão (CRESESB, 1999).

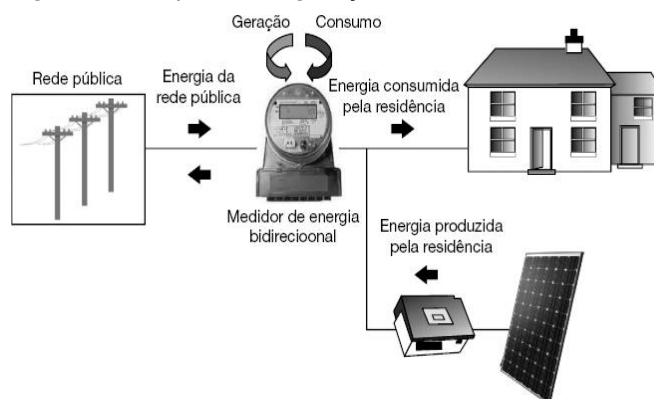
Existem indícios que a geração descentralizada de energia solar a partir de células fotovoltaicas contribui para tornar a matriz energética mais limpa, minimizando o impacto sobre o meio ambiente, diminuindo as perdas de eletricidade, otimizando a infraestrutura de distribuição e sensibilizando os consumidores sobre o uso mais eficiente da energia (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

No Brasil, esses benefícios são ainda mais notáveis devido à intensa incidência de luz solar em comparação com a média global, o que resulta em maior eficiência do sistema.

2.2.4.1 COMPONENTES DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

De acordo com Albuquerque, Maldonado e Vaz (2017), o princípio básico de operação dessa tecnologia envolve a transformação da energia solar em energia elétrica por meio dos efeitos da radiação solar em materiais semicondutores. No entanto, para que esse processo funcione de maneira eficaz, é crucial compreender todos os elementos que desempenham um papel fundamental em sua eficiência. Esses elementos incluem o painel solar, o inversor, o medidor e a rede elétrica, nessa ordem, conforme FIGURA 5.

Figura 5 – Esquema da geração distribuída em residências



Fonte: Moreira (2021)

Os painéis solares são dispositivos empregados para transformar a energia proveniente da luz solar em energia elétrica. Eles são construídos com células solares, denominadas assim porque têm a capacidade de absorver, em sua maioria, a luz solar. Esses painéis solares desempenham um papel fundamental na criação de energia solar e podem ser localizados em várias áreas, sendo mais comuns nos telhados das residências (OCA ENERGIA, 2020).

Os inversores são conversores elétricos que transformam a energia produzida pelos módulos solares de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Essa transformação é necessária para tornar compatível a energia elétrica produzida pelas placas solares com aquela usada na rede elétrica, permitindo assim a sua utilização em aparelhos elétricos (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

O medidor desempenha a função de realizar a mensuração da quantidade de energia elétrica enviada e recebida pelo consumidor. Isso é essencial para calcular com precisão a compensação apropriada dos créditos na conta de energia do consumidor (ENTEC Solar, 2019).

A rede elétrica é uma estrutura de conexão que permite a entrega da eletricidade dos produtores aos consumidores. Ela é fundamental para viabilizar as atividades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2010).

2.2.4.2 TIPOS DE SISTEMAS

Os sistemas de energia solar fotovoltaica são categorizados em três tipos distintos: aqueles que estão conectados à rede, também chamados de *on grid*; os sistemas isolados, ou *off grid*, que operam independentemente da rede elétrica; e os

sistemas híbridos, que combinam características dos dois tipos mencionados anteriormente (CRESESB, 2006).

Os sistemas conectados à rede elétrica, conforme modelo observado na FIGURA 6, operam em sincronia com a rede principal de eletricidade, o que significa que, além de receber energia dos painéis solares ou outros geradores, também podem utilizar a eletricidade fornecida pelas concessionárias por meio das linhas de distribuição. Esses sistemas não requerem o uso de baterias em sua configuração (DARGHOUTH et al., 2016), e no caso de a geração de energia ser maior do que o consumo, o excedente é convertido em créditos que podem ser usados para compensar o consumo futuro.

Figura 6 – Esquema dos sistemas conectados à rede



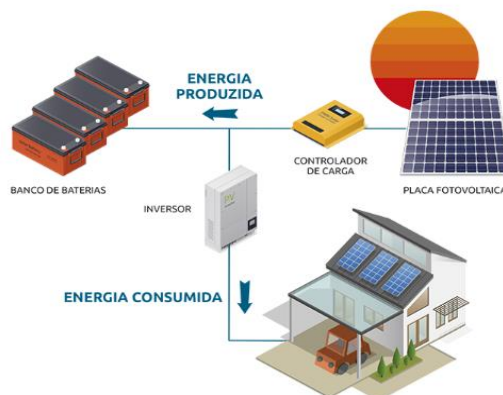
Fonte: Cia Solar (2021)

Os sistemas que funcionam de forma independente da rede elétrica convencional não têm nenhuma ligação com a infraestrutura de distribuição de energia, conforme modelo visualizado na FIGURA 7. Geralmente, são adotados em áreas onde é complicado e dispendioso estabelecer redes elétricas convencionais da concessionária, muitas vezes devido a grandes distâncias ou altos custos associados à instalação de cabos e infraestrutura (MILLER; HOPE, 2000).

Adicionalmente, esses sistemas são frequentemente referidos como sistemas autônomos, pois têm a capacidade de estabelecer suas próprias regras de operação. Eles armazenam a energia gerada em baterias para ser utilizada posteriormente,

especialmente durante os períodos em que não há exposição solar, possibilitando assim a utilização da energia armazenada (FREITAS, 2008).

Figura 7 – Esquema dos sistemas isolados da rede



Fonte: Eco Aquecedores (2020)

Os sistemas híbridos são uma combinação de sistemas isolados e sistemas conectados à rede elétrica. Isso significa que, além de estarem conectados à rede, eles também podem ser alimentados pela energia armazenada nas baterias. Esses sistemas oferecem uma economia significativa, pois durante os períodos de menor incidência solar, eles são alimentados pelo banco de baterias. No entanto, é importante ressaltar que esse tipo de sistema tem um custo mais elevado, pois requer um inversor fotovoltaico híbrido e outros equipamentos adicionais (Portal Solar, 2022).

2.2.4.3 LEI 14.300

A Lei 14.300, também conhecida como Marco Legal da Geração Distribuída, foi publicada no Diário Oficial da União em 7 de janeiro de 2022. Essa lei estabelece um novo marco regulatório para o segmento (BRASIL, 2022).

Antes das mudanças, os consumidores que usavam sistemas de minigeração distribuída pagavam uma taxa de demanda com base na quantidade de eletricidade consumida em sua propriedade, conhecida como Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição para Consumo (TUSD C). Agora, com a Lei 14.300/22 em vigor, esses consumidores são cobrados com base na potência de eletricidade que geram e injetam na rede por meio de suas usinas, usando a Tarifa do Uso do Sistema de

Distribuição para Geração (TUSD G) ou por meio de um Montante do Uso do Sistema de Distribuição (MUSD) (ENERGES, 2023).

Isso significa que a cobrança está relacionada à quantidade de eletricidade que eles geram e contribuem para a rede, em vez de apenas ao consumo direto em suas propriedades. Caso a demanda contratada de geração seja maior que a de consumo, esse consumidor deve pagar a demanda consumo (TUSD C) e a diferença entre a demanda geração e consumo, sendo essa diferença conhecida como TUSD G.

A conta de energia dos consumidores classificados como grupo B é composta pela Tarifa de Energia (TE) e pela Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). É importante destacar também que, com a instauração da lei 14.300/22, passou a ser contemplado para a conta de energia do grupo B que possui geração distribuída, uma tarifa que incide sobre o Fio B, sendo essa tarifa, uma parte da TUSD que não é devolvida para tais consumidores. Teve início em 2023 com 15% e finalizará em 90% a partir de 2028, sendo 2029 o ano que entrará em vigor a regra disposta no artigo 17.

A Lei também estabelece uma etapa de transição para a cobrança de tarifas de uso dos sistemas de distribuição por parte de micro e minigeradores. Até 2045, micro e minigeradores existentes pagarão os componentes da tarifa somente sobre a diferença — se esta for positiva — entre o consumido e o gerado e injetado na rede de distribuição, como já ocorre hoje (BECKER, 2022).

Juntamente com a Lei, veio o Programa de Energia Renovável Social (PERS), destinado a financiar a instalação de geração fotovoltaica e outras fontes renováveis para consumidores de baixa renda. Os recursos devem ter origem no Programa de Eficiência Energética (PEE) (BECKER, 2022).

2.2.5 IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA MÉDIA TENSÃO

Foi realizado um estudo sobre os impactos causados pela geração distribuída fotovoltaica pertencentes a distribuidora de Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC). Os resultados mostraram alterações nos níveis de tensão nos alimentadores e no perfil das perdas técnicas, dependendo da potência de geração instalada. Foi verificado que a GD fotovoltaica contribui para reduzir as perdas técnicas até um determinado limite de penetração, passando posteriormente a incrementá-las, os valores observados para diferentes alimentadores variam entre 50% e 90% de inserção (DJAMBOLAKDJIAN, 2022).

Em um outro estudo recente de Pietrowski (2022), foi verificado via simulação, que em um dos alimentadores de uma concessionária de energia elétrica do Rio Grande do Sul apresenta em seu estado normal de funcionamento, com a GD nominal presente. Porém, ao analisar com o uso de informações obtidos em consulta em dados de histórico armazenado e dados de operação em tempo real da subestação São Sepé, e simular novamente com as condições atuais de operação com tensão de 1,03 pu na barra de média tensão (MT) em regime permanente, foi possível perceber um incremento na tensão ao longo do circuito, principalmente nas proximidades da conexão da minigeração de maior potência, que mesmo estando distante da fonte, teve um aumento no nível de tensão em PU, em determinados momentos.

O alimentador GUL-115, localizado no estado de São Paulo, por ter alcançado a respectiva capacidade máxima, foi utilizado como base para um estudo de previsibilidade na capacidade de inserção de máquinas geradoras de grande porte, visando aliviar tal alimentador (DIAS, 2005).

Com a presença da geração distribuída, foi possível identificar que influenciou positivamente no perfil da tensão nos pontos próximos à sua instalação, compensando a queda de tensão relativa às perdas no alimentador. E se tratando de perdas, apresentaram melhor resultado do que a operação antes da GD (PIETROWSKI, 2022).

2.2.6 USO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.2.6.1 REGRAS

A nova atualização, prevista inicialmente para 2019, foi realizada por meio da Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Esse Ato promoveu adequações dos regulamentos da ANEEL às disposições da Lei nº 14.300, de 7 de janeiro de 2022, bem como aos estudos promovidos desde 2018.

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) permite o uso de qualquer fonte de energia renovável, além da cogeração qualificada. Isso significa que, por exemplo, um sistema de minigeração distribuída (MMGD) fotovoltaico pode gerar energia durante o dia e, se houver excedente, essa energia pode ser injetada na rede elétrica. À noite, quando a produção do sistema fotovoltaico é reduzida, a energia armazenada na rede pode ser utilizada para suprir as necessidades adicionais da unidade consumidora. Essencialmente, a rede elétrica funciona como uma espécie

de bateria, armazenando o excesso de energia gerado durante o dia e disponibilizando-a quando o consumidor precisar, garantindo que a energia esteja disponível quando não houver geração a partir da fonte renovável (ANEEL, 2022a).

Entre as maneiras de participação no SCEE estão o autoconsumo local, o autoconsumo remoto, a geração distribuída em empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras e geração compartilhada (BECKER, 2022).

Essas opções oferecem liberdade aos consumidores individuais e grupos que queiram produzir sua própria eletricidade a partir de fontes de energia renovável e utilizá-la de forma inteligente, permitindo que o excesso de energia seja usado de forma eficaz e compartilhado entre diferentes consumidores de acordo com acordos feitos pelos participantes do SCEE (ENERGIA HOJE, 2023)

É fundamental destacar que não é permitido dividir uma central geradora em unidades menores apenas para se adequar aos limites de potência estabelecidos para microgeração ou minigeração distribuída. Isso está expressamente proibido de acordo com o parágrafo 2º do artigo 11 da Lei 14.300/2022 e no artigo 655-E da Resolução Normativa nº 1.000/2021. A responsabilidade de identificar tais casos cabe à empresa distribuidora de energia (BECKER, 2022).

2.2.6.2 CONDIÇÕES PARA A ADESÃO

A decisão de instalar um sistema de micro ou minigeração distribuída fica a cargo do consumidor, portanto, o consumidor precisa avaliar diversos fatores, como o tipo de fonte de energia, a tecnologia dos equipamentos, o tamanho da unidade consumidora e da central geradora, a localização (rural ou urbana), a tarifa de energia, as regras de compensação, as opções de pagamento/financiamento, e a possibilidade de compartilhar o excedente de energia com outras unidades consumidoras (RUDDY, 2023).

Para unidades consumidoras em baixa tensão (grupo B), mesmo que você injete mais energia na rede do que consome, ainda será necessário pagar uma taxa de disponibilidade que equivale a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico) em dinheiro. No entanto, para consumidores em alta tensão (grupo A), a parte da sua conta de energia relacionada ao consumo de eletricidade pode ser anulada se a quantidade de energia que você injeta na rede durante o mês for igual ou superior à quantidade de energia que você consome (ANEEL, 2022a).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 TIPO DE PESQUISA

O propósito deste trabalho foi investigar métodos para avaliar os possíveis impactos decorrentes da inserção excessiva de geração distribuída nas redes de média tensão. Para atingir esse objetivo, optou-se por realizar uma pesquisa exploratória, com a principal finalidade no aprimoramento de conceitos e por se destacar devido sua natureza flexível, permitindo uma abordagem ampla e diversificada em relação ao tema de estudo (GIL, 2002).

3.2 COLETA DE DADOS

Para a obtenção de dados, foram empregados dois métodos distintos: pesquisa bibliográfica e estudo de caso. Ambos com uma abordagem que englobou tanto aspectos qualitativos quanto quantitativos. A pesquisa bibliográfica fundamentou-se na análise de literatura especializada, dissertações, diretrizes e regulamentações relevantes ao tema em questão. Essa abordagem foi utilizada para embasar e discutir os métodos detalhados na evolução do trabalho. Quanto à aplicação do método de estudo de caso, o foco foi na implementação das propostas delineadas no desenvolvimento do projeto e conduzida uma análise técnica avaliando a viabilidade de aplicação dessas propostas, sendo que para tal estudo, os dados fornecidos foram disponibilizados pela concessionária de energia local.

3.3 TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

A pesquisa bibliográfica permitiu a identificação e o desenvolvimento de medidas coerentes para aprimorar a gestão e a eficiência energética neste trabalho. No que diz respeito ao estudo de caso, os dados foram processados por meio de softwares e editores de planilhas eletrônicas, que resultaram na criação de tabelas e gráficos. Inicialmente, os dados fornecidos pela empresa foram analisados, e posteriormente, fora feita uma consulta para viabilidade de métodos para sua implementação. Com a execução das ações propostas, foram examinados os resultados técnicos para compreender os efeitos gerados por essas intervenções.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 CONCESSIONÁRIA LOCAL

Com mais de um século de atuação, o Grupo Energisa se destaca como um dos principais conglomerados privados do setor elétrico do Brasil, com capital nacional, sendo conhecido por oferecer uma ampla gama de produtos e serviços voltados para impulsionar a transformação no cenário energético, conectando indivíduos e empresas às soluções energéticas mais adequadas e contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável (Coluna do CT, 2023). Segundo a Distribuidora de Energia S/A (2024), no Estado do Tocantins está atuando há cerca de 9 anos, prestando serviços a 666 mil consumidores cativos e 192 livres, distribuídos em 139 municípios.

A empresa utiliza indicadores para monitorar a qualidade e a assertividade de suas operações, sendo esses responsáveis por registrar as ocorrências através de suas duração e frequência, permitindo uma análise detalhada do desempenho dos equipamentos. Contudo, as potências ativas e reativa são dois conceitos essenciais na medição e distribuição de energia elétrica pelas concessionárias, em que através destas as concessionárias de energia medem a energia elétrica fornecida aos consumidores, sendo indispensável para determinar a eficiência do consumo de energia e garantir que o sistema elétrico permaneça estável e operacional.

A potência ativa (P) representa a energia utilizada diretamente para executar tarefas úteis, aquela que é convertida em trabalho e tem como unidade de medida no SI o Watt (W), enquanto a potência reativa (Q) se torna crucial devido à natureza variável das fontes renováveis comuns na GD que é associada aos campos elétricos e magnéticos das cargas indutivas e capacitivas e tem sua unidade estabelecida como o Volt-Ampére reativo (VAr) (FORTI, 2017). A compensação da potência reativa gerada por sistemas de GD é necessária para manter a estabilidade da rede elétrica, sendo necessário soluções para gerenciar o fluxo de energia e assegurar a confiabilidade do sistema elétrico em um cenário de crescente uso de fontes renováveis distribuídas. Além disso, a relação entre potência ativa e reativa determina o fator de potência (FP), crucial para avaliar a eficiência energética.

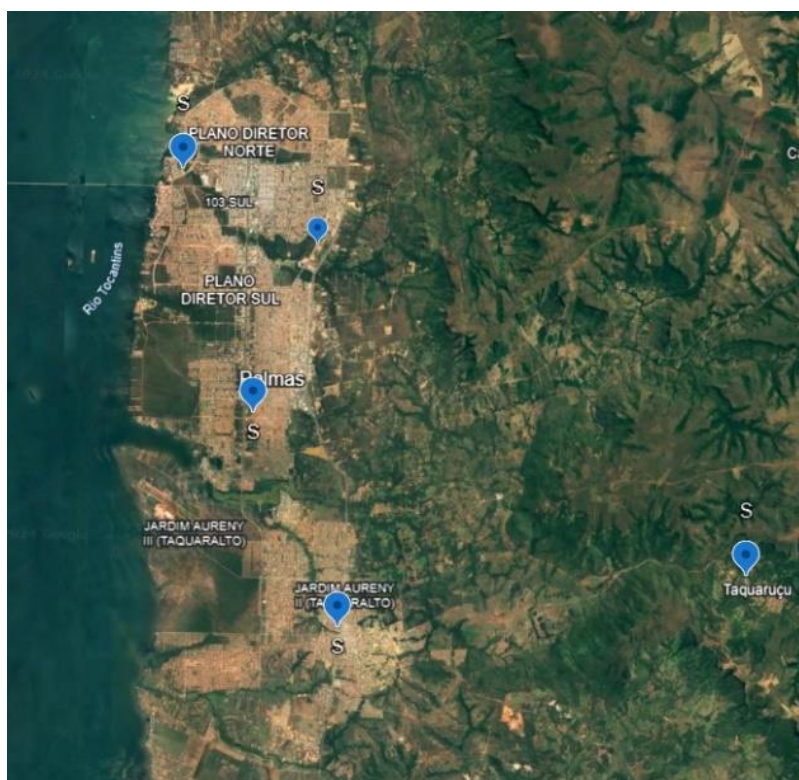
O fator de potência é a medida da diferença de tempo entre a forma de onda senoidal da tensão elétrica e da corrente elétrica, variando entre 0 e 1 (MARTINS,

2008). É preferível que essa diferença seja mínima, idealmente zero, pois isso significa que a forma de onda da corrente está em fase com a da tensão, o que resulta em uma potência total mais eficiente. Um aumento nessa discrepância resulta em um fator de potência menor, indicando uma qualidade inferior da energia elétrica, caracterizada por mais distorções e energia reativa na rede.

4.2 LOCAL DE ESTUDO

No que diz respeito à infraestrutura elétrica de Palmas, a cidade conta com cinco subestações de média tensão, como mostrado na FIGURA 8. Dessas, quatro operam com tensão de 13,8 kV e uma com 13,8/34,5 kV.

Figura 8 – Subestações em Palmas - TO



Fonte: Google Earth (2024)

No contexto do estudo, é crucial ressaltar as particularidades da capital do estado do Tocantins, Palmas, especialmente sua variação climática ao longo do ano. De agosto a outubro, prevalece o período de seca, enquanto de novembro a abril é caracterizado por chuvas mais intensas. Para compreender melhor essas flutuações, foram analisados dados de medição em diferentes épocas do ano.

Essas variações climáticas sazonais são de extrema importância para o estudo dos impactos, uma vez que influenciam diretamente o consumo e a demanda por energia elétrica na região. A época de seca, por exemplo, pode resultar em um aumento no uso de sistemas de refrigeração e climatização, enquanto os períodos chuvosos podem demandar mais energia para o funcionamento de equipamentos de bombeamento e drenagem, além de afetar a geração de energia hidrelétrica.

4.3 CARACTERÍSTICAS DO ALIMENTADOR DO ESTUDO

O alimentador analisado é de 13,8 kV e está situado em uma área estratégica da cidade, fornecendo energia para uma variedade de clientes de diferentes classes. Conforme indicado no gráfico da TABELA 2, ao longo dos anos observou-se um aumento anual médio de cerca de 2,74% no número de clientes, resultando em um aumento total de 14,36% durante o período mencionado. Isso equivale a um acréscimo de 574 novos consumidores.

Tabela 2 – Crescimento de consumidores no alimentador - %

Ano	%
2018	-
2019	3,45
2020	2,08
2021	-0,36
2022	2,62
2023	5,91

Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

De acordo com a TABELA 3, entre 2018 e 2023, houve um aumento de aproximadamente 21.000%. Enquanto em 2018 apenas 3 consumidores possuíam GD instalada, em 2023 esse número aumentou significativamente para 623 clientes, com suas instalações já concluídas e operando plenamente. Portanto, no alimentador em análise, observa-se um crescimento exponencial no número de consumidores que possuem GD instalada em suas residências.

Tabela 3 – Quantidade de Conexões de GD no alimentador ao longo dos anos

Ano	Qtd de Conexões GD	Cresc. Qtd GD %	Potência Instalada (kW)	Cresc. Pot. Inst %
2018	3	-	16	-
2019	24	800%	187	1169%
2020	99	413%	1207,14	646%
2021	191	193%	1957,7	162%
2022	328	172%	3076,1	157%
2023	623	190%	6293,81	205%

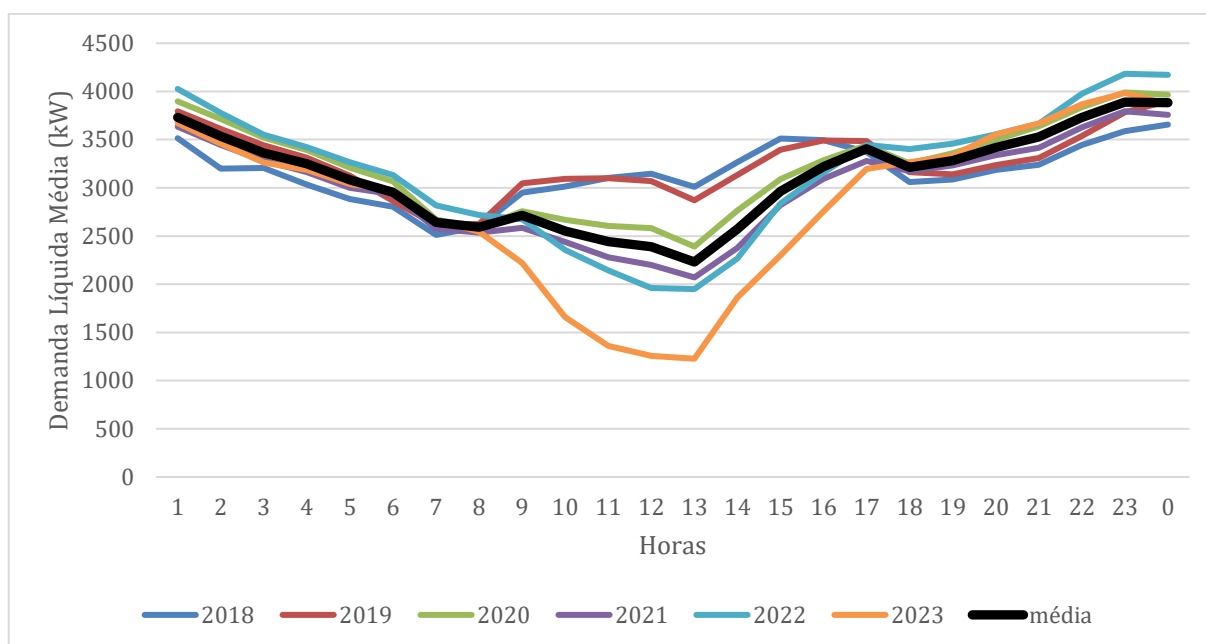
Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

O aumento no número de conexões de GD também gerou um notável aumento na potência instalada. Conforme mostrado na TABELA 3, em 2018, esses consumidores totalizavam 16 kW de potência instalada, um valor que não representava riscos significativos para a rede de média tensão. No entanto, em 2023, com 623 consumidores utilizando GD, a potência instalada aumentou para cerca de 6,3 MW, o que pode potencialmente sobrecarregar a rede elétrica e acarretar outros impactos.

A análise dos dados revela uma tendência significativa no aumento das conexões em relação ao crescimento do número total de clientes ao longo do período considerado. Essa disparidade sugere uma demanda crescente desses sistemas entre os consumidores da área analisada.

Essa observação é claramente ilustrada na Figura 9, onde ao longo dos anos há uma diminuição notável na demanda líquida do alimentador, especialmente durante o período entre 8:00 e 16:00, quando a GD está em operação. Nos horários restantes, quando predominam apenas cargas, percebe-se níveis mais elevados de demanda líquida no alimentador, principalmente seus picos frequentes entre as 22:00 e 23:00. O ano de 2023 evidencia que a curva de carga tende a diminuir no período entre 8:00 e 16:00 de forma progressiva ao longo dos anos, sendo que um dos principais motivos para isso será a adição de mais conexões.

Figura 9 – Curva da demanda líquida média por hora – Anual



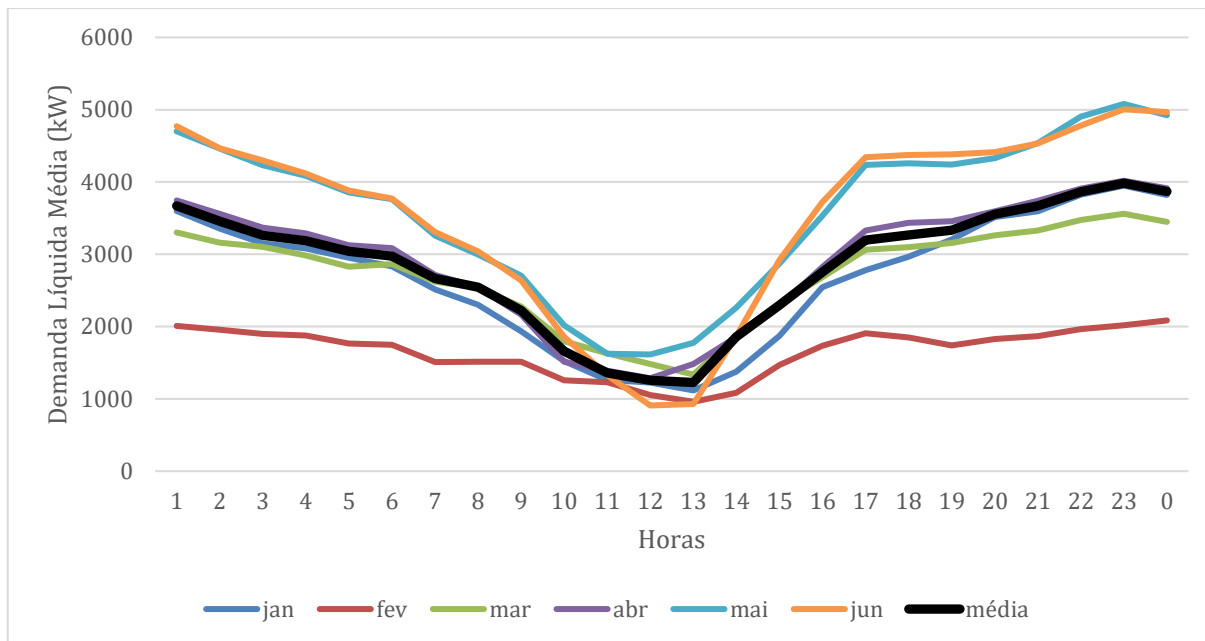
Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

Na FIGURA 10 é possível observar esses dados por mês e nota-se que para ambos os meses do ano em questão as curvas seguem um mesmo padrão, exceto fevereiro que seguiu uma curva atípica, ficando estabilizada em todos os horários. Segundo o G1 Tocantins (2023), Palmas contabilizou 279 milímetros de chuva em fevereiro e superou a média dos últimos 30 anos. Contudo, não é possível afirmar que apenas esse fator pode ter influenciado nessa medição, podendo ter ocorrido problemas nas medições, transferências de carga e fatores climáticos.

Para desdobrar esse entendimento por mês, mesmo não compreendendo o ano fechado optou-se por utilizar o ano de 2023, visto que é o ano que mais se aproxima da situação atual e possui a maior quantidade de capacidade instalada, sobre a qual as medições foram baseadas.

Nos outros meses, observou-se um padrão semelhante entre eles, com uma alta demanda no início do dia que diminui até as 8:00, seguida por uma queda mais pronunciada devido à GD até as 16:00. Partindo disto, a demanda volta a crescer, alcançando o pico por volta das 22:00 e se estabilizando durante a madrugada.

Figura 10 – Curva da demanda líquida média por hora – Mensal 2023



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

Nos finais de semana, especialmente, notou-se uma alteração na curva, resultando em um fluxo reverso durante a transição da manhã para a tarde. Essa tendência pode se tornar mais frequente com a expansão da GD em larga escala.

Além disso, os dados não revelaram uma correlação clara no período noturno entre as medições do alimentador analisado e a curva de carga conhecida como "curva do pato", principalmente devido às variações observadas na forma da sua curva de pico. Contudo, nos demais horários que abrangem os períodos da manhã e da tarde fica notório a semelhança entre as curvas, principalmente quando utilizada a curva da média anual de 2023.

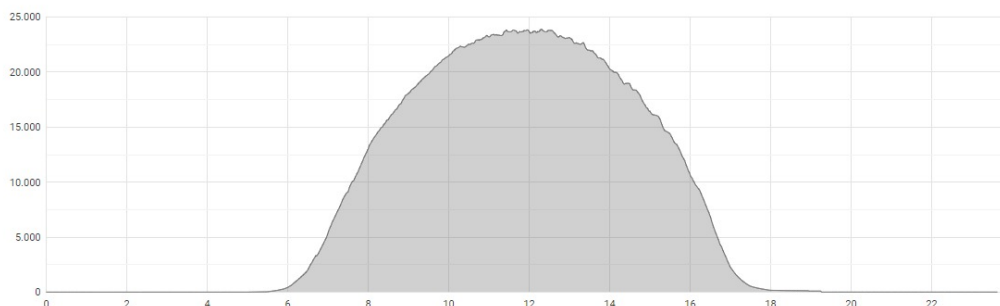
4.4 ASPECTOS TÉCNICOS

4.4.1 FLUTUAÇÃO DA GERAÇÃO

A geração de energia solar fotovoltaica, por sua natureza intermitente, introduz flutuações na carga da rede de distribuição de média tensão. Essas flutuações decorrem das variações na produção solar, que são influenciadas por condições meteorológicas e diurnas, sendo notório na FIGURA 11. Essas variações resultam em picos na geração de eletricidade e representam desafios para a estabilidade e

confiabilidade das redes elétricas, especialmente quando ocorrem mudanças climáticas repentinas ou fenômenos que causam sombreamento temporário. Vale ressaltar que o horário de 12 horas corresponde ao horário de maior incidência da geração solar.

Figura 11 – Curva da Geração Solar no Brasil – 07/06/2024



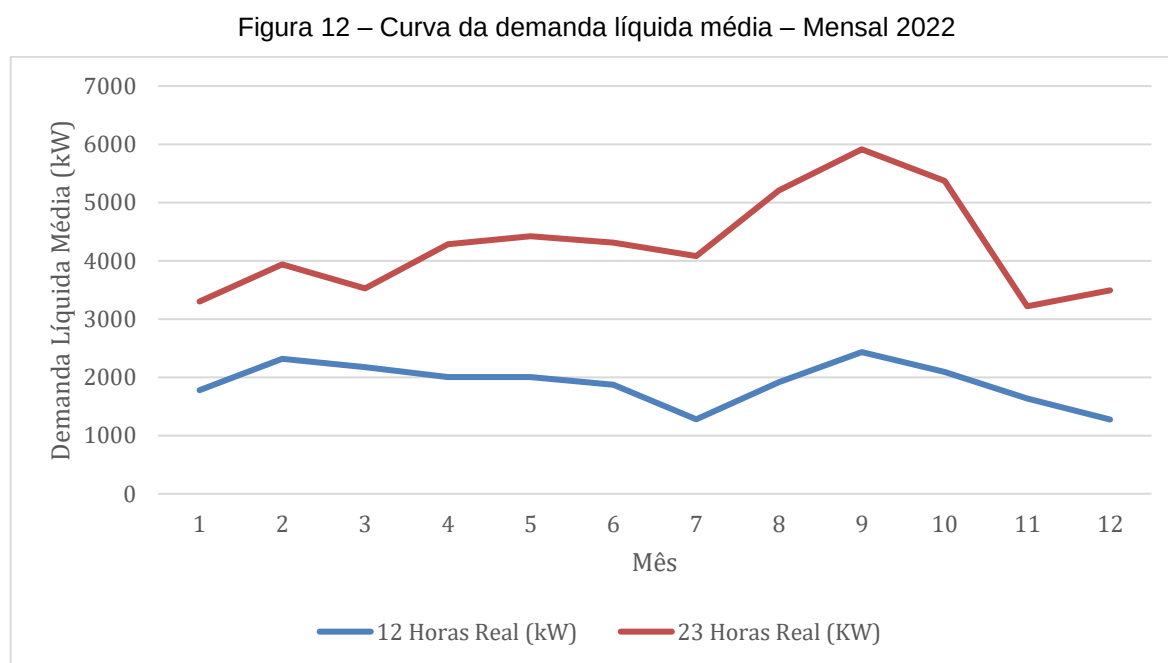
Fonte: ONS (2024)

Apesar dos desafios apresentados pelas flutuações na geração de energia, decorrentes da natureza intermitente das fontes renováveis, essas também oferecem oportunidades para inovação e avanço tecnológico. Estratégias como armazenamento de energia, previsão avançada, diversificação de fontes e o desenvolvimento de redes inteligentes desempenham um papel fundamental na mitigação dos impactos das flutuações e na garantia da estabilidade e eficiência das redes elétricas em um cenário de geração mais variável.

A flutuação na geração ao longo do ano é influenciada por fatores ambientais e climáticos. Por exemplo, meses mais quentes (junho a setembro) tendem a diminuir a demanda líquida média durante os picos de GD fotovoltaica. Isso ocorre porque a geração solar é adicionada à capacidade existente, reduzindo a necessidade de energia da rede em determinados momentos. Em contrapartida, meses com maior incidência de chuvas (outubro a abril) podem aumentar essa demanda líquida média, mesmo que durante os picos de geração solar, pois o alimentador não terá ajuda para suprir a demanda necessária.

Tal explicação é evidenciada na FIGURA 12. E para uma melhor compreensão, é importante destacar que no alimentador estudado, o horário de pico de demanda é correspondente ao horário de 23 horas, e nesse horário, não há a presença de

geração solar fotovoltaica. Partindo também do princípio expresso anteriormente, de que 12 horas é o horário de maior incidência de geração solar, é possível fazer uma correção entre os dois horários, a fim de observar o impacto que a geração distribuída fotovoltaica, somada às demais gerações distribuídas, provoca na demanda líquida média do alimentador. A linha vermelha representa a média real da demanda líquida às 23 horas, enquanto a linha azul indica a média, porém às 12 horas. Além disso, para análise foi utilizado o ano de 2022, por ser o ano mais atual que contém medições para o ano completo. Como a FIGURA 12 foi montada com o eixo “X” sendo os meses do ano de 2022, e o eixo “Y”, sendo a demanda líquida média em kW, é possível identificar e concluir que, ao comparar a demanda líquida média dos horários citados, há uma variação entre os horários, de acordo com as condições climáticas características de cada período do ano, não mantendo-se as médias proporcionais e constantes entre si.

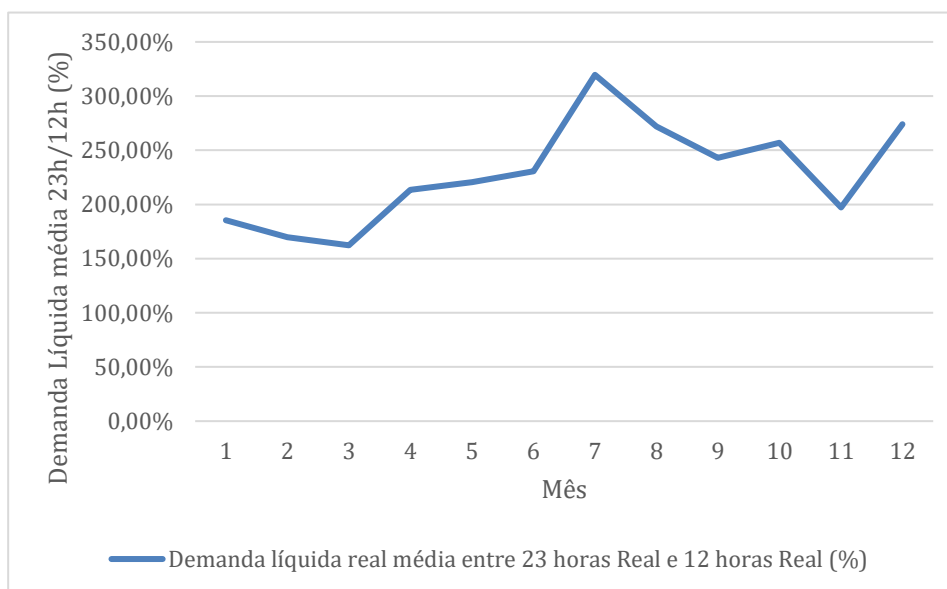


Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

Através da FIGURA 13, é possível perceber, em percentual, que em meses classificados como quentes no local estudado (junho a setembro), a relação entre a demanda líquida média do horário de 23 horas (pico de demanda no alimentador estudado, consoante ao expresso anteriormente) tende a ser cada vez maior em relação a demanda líquida média do horário de 12 horas (pico de geração distribuída

fotovoltaica, conforme previamente descrito). E o cenário contrário é verdadeiro, onde meses com maiores incidências de chuvas (outubro a abril), tende a ter uma relação de demanda líquida média cada vez menor entre os horários comparados, visto que a GD fotovoltaica colabora cada vez menos com a redução da carga no alimentador.

Figura 13 – Curva comparativa da demanda líquida média entre 23h e 12h – mensal de 2022



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

4.4.2 CONTROLE DE TENSÃO

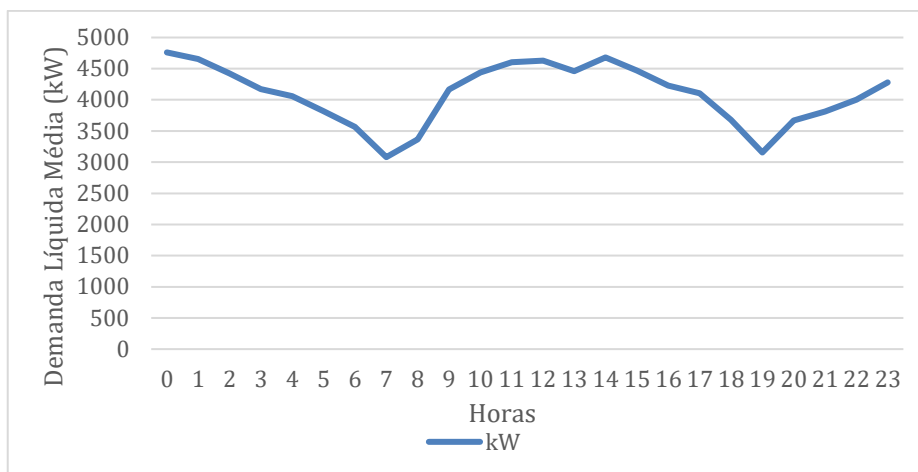
O controle da tensão em sistemas com geração distribuída apresenta diversos desafios técnicos, operacionais e regulatórios. Para garantir a estabilidade e eficiência da rede elétrica, especialmente com o aumento da geração de energia descentralizada, é crucial adotar soluções avançadas. Entre essas soluções estão dispositivos de controle inteligentes, sistemas de armazenamento de energia e regulamentações adequadas.

Para fins de comparação, foram analisadas duas datas: uma em que não há influência significativa da GD e outra mais recente, onde tem um impacto relevante.

- **DIA 02/01/2018:**

A curva de carga mostrada na FIGURA 14 refere-se ao dia 02/01/2018. Nesse dia, não havia geração fotovoltaica significativa no alimentador em estudo, resultando em uma curva de carga mais linear, sem picos e vales causados pela GD.

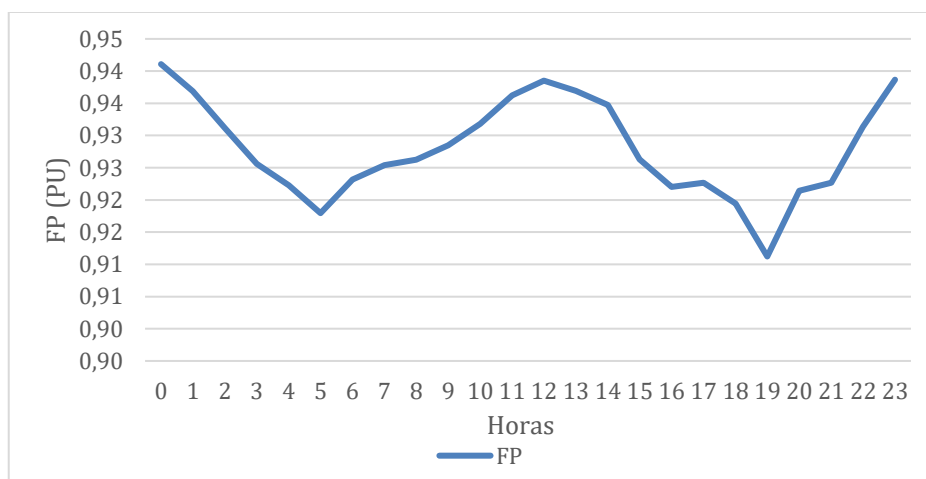
Figura 14 – Curva de carga do dia 02/01/2018



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

A análise dos resultados foi realizada ao longo de um dia com um perfil de carga predominantemente residencial. Observou-se um fluxo de energia unidirecional, da fonte para a carga, com a potência permanecendo constante e proporcional. A FIGURA 15 apresenta o fator de potência na saída do alimentador.

Figura 15 – FP ao decorrer do dia 02/01/2018



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

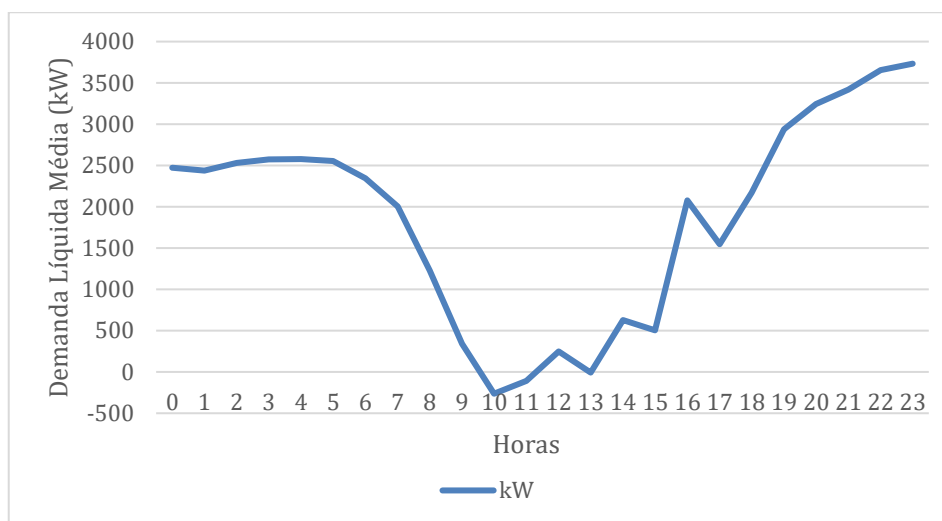
Inicialmente, houve uma leve queda na tensão pela manhã, seguida por uma elevação entre as 5 e 12 horas. Após isso, o FP diminuiu novamente até as 19 horas, seguida por outro aumento até o final do período analisado. Essas variações são consideradas normais devido às flutuações na potência ativa e, durante o período analisado, ainda não havia medições da geração de energia por parte da GD.

- **DIA 01/01/2023:**

A curva de carga apresentada na FIGURA 16 refere-se ao dia 01/01/2023. Nessa data, a geração fotovoltaica operou entre 6h e 18h, atingindo seu pico máximo de potência no período entre 10h e 13h.

A análise dos resultados foi conduzida ao longo de um dia com um perfil de carga predominantemente residencial. Durante os períodos de maior geração de potência, houve um fluxo incomum, já que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) foi originalmente projetado para um fluxo de energia unidirecional, da fonte para a carga. Esse fluxo reverso é causado pela GD, que reduz a potência ativa fornecida pela subestação, como pode ser visto durante o tempo em que ela está operando.

Figura 16 – Curva de Carga do dia 01/01/2023

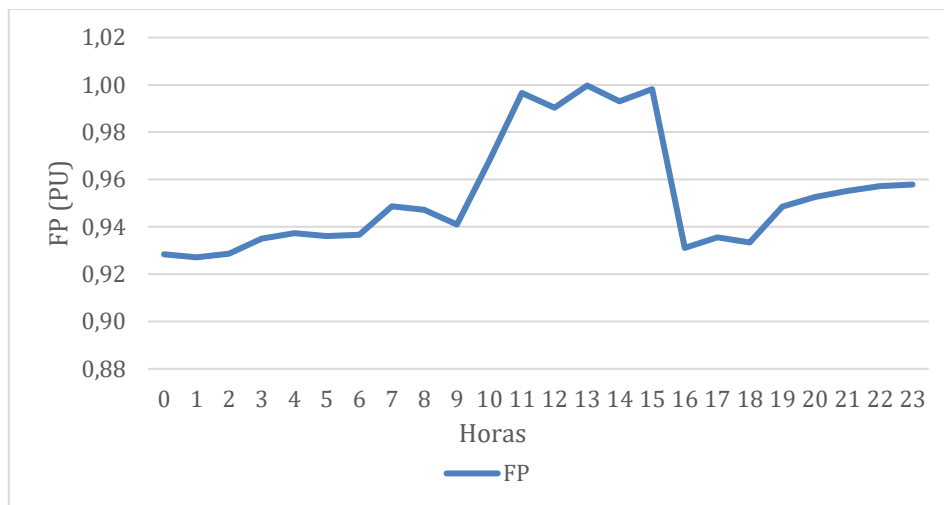


Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

A FIGURA 17 mostra o fator de potência na saída do alimentador. Nota-se que houve uma leve elevação no FP do alimentador durante o período de operação da GD. Esse aumento é causado pela reversão da direção do fluxo de potência quando a energia é injetada na rede. No entanto, mesmo com a presença da GD, a tensão permaneceu dentro dos limites operacionais. Observa-se um comportamento inesperado no fator de potência durante a inversão de fluxo, quando a potência ativa se aproxima de zero. Nessa situação, esperava-se que o fator de potência aproximasse de zero, mas os dados mostram que não é o que acontece. Esse

aumento levanta a questão da possível presença de dispositivos de compensação de potência reativa na subestação.

Figura 17 – FP ao decorrer do dia 01/01/2023



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

O fator de potência (FP) é essencial para garantir a eficiência do sistema elétrico. Um FP próximo de 1 indica que a energia está sendo utilizada de forma eficiente, enquanto valores mais baixos indicam uma qualidade inferior da energia elétrica. A GD, ao contribuir com energia para a rede e, em alguns casos, ao absorver energia, torna o controle de tensão mais complexo devido à sua natureza dinâmica e variável.

A incorporação de sistemas fotovoltaicos (SFV) nas redes elétricas pode causar variações consideráveis na tensão, como sobretensões e subtensões. No entanto, no estudo de caso analisado, essas flutuações não foram observadas, pois os níveis de tensão permaneceram dentro dos limites aceitáveis para os dias analisados.

Enquanto as sobretensões ocorrem quando a tensão excede os níveis normais esperados, geralmente devido a picos na geração solar, falta de controle de tensão ou mau funcionamento dos dispositivos de regulação. As subtensões por outro lado, ocorrem quando a tensão cai abaixo dos níveis normais, muitas vezes devido à produção solar insuficiente, problemas nos inversores ou à qualidade inferior da rede elétrica.

Para lidar com esses desafios, podem ser implementadas soluções como reguladores de tensão e dispositivos de compensação de potência reativa. Essas

medidas ajudam a mitigar os efeitos adversos das variações de tensão causadas pela geração distribuída de energia solar.

4.4.3 DIMINUIÇÃO DE PERDAS

A diminuição de perdas no sistema elétrico, por meio da geração mais próxima do consumo, é uma estratégia crucial para otimizar a eficiência e a sustentabilidade das redes de energia. Essa abordagem, muitas vezes associada à geração distribuída, busca reduzir as perdas de transmissão e distribuição ao gerar eletricidade mais próxima dos pontos de consumo (SEVERINO, 2008).

É possível identificar uma redução de perdas de transmissão, pois ao gerar eletricidade mais próxima dos consumidores, diminuem as distâncias de transmissão, reduzindo as perdas de energia associadas à resistência dos cabos e linhas elétricas. Provoca também o aumento da eficiência, visto que a GD pode operar em escalas menores e mais eficientes, muitas vezes aproveitando fontes de energia renovável, o que contribui para a eficiência geral do sistema.

Há também a melhoria na confiabilidade, pois esses sistemas podem aumentar a resiliência da rede elétrica, fornecendo redundância e garantindo um suprimento mais confiável de eletricidade, especialmente em emergências. E ainda contribui com a redução de investimentos em infraestrutura, já que uma geração mais próxima ao consumo pode reduzir a necessidade de investimentos significativos em expansão de redes de transmissão, resultando em custos operacionais mais baixos (SEVERINO, 2008).

4.4.4 REDUÇÃO DE CARGA

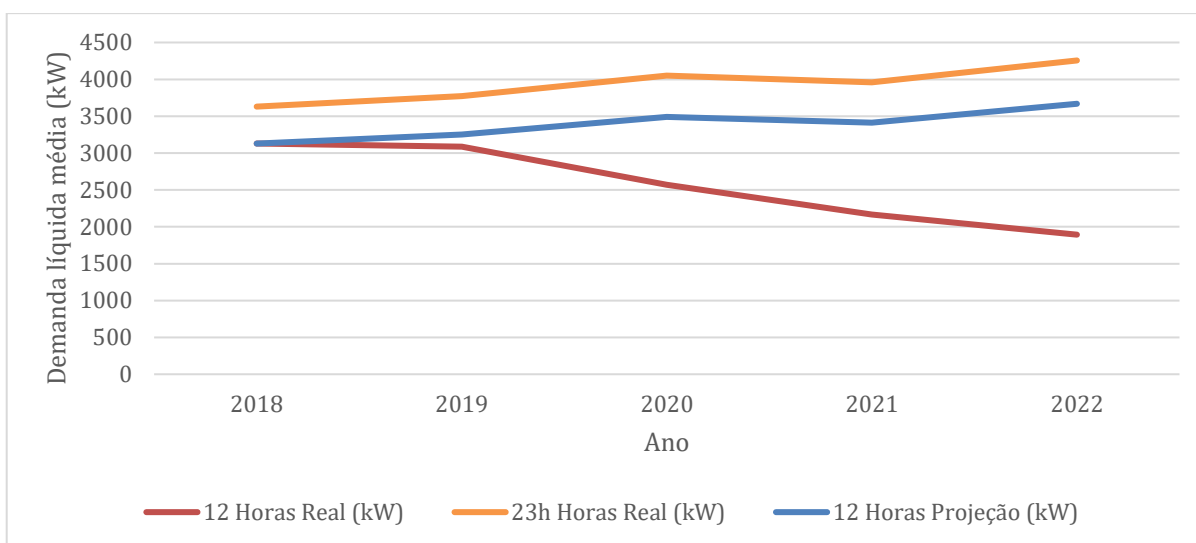
A redução de carga nas redes de distribuição, impulsionada pelo aumento do autoconsumo, tem impactos significativos na operação, planejamento e na resiliência das redes elétricas. Essa mudança de paradigma, onde as cargas são alimentadas principalmente por meio do autoconsumo, traz consigo uma série de desafios e oportunidades que influenciam a forma como as redes de distribuição são projetadas, operadas e mantidas.

O autoconsumo reduz a demanda nas redes de transmissão e distribuição, uma vez que a energia é gerada e consumida localmente (SEVERINO, 2008). Concomitante a isso, surge o alívio de congestionamento, pois com menos carga a

ser transmitida através das linhas, a congestão nas redes de transmissão é reduzida, melhorando a eficiência operacional e diminuindo a necessidade de investimentos em expansões significativas.

Na FIGURA 18, há três linhas distintas que representam diferentes cenários de demanda líquida média em um alimentador, sendo a linha laranja a real curva de demanda líquida média no horário de 23 horas, a azul correspondente a uma projeção de demanda líquida média para o horário de 12 horas, e por último, a linha vermelha equivalente a real curva de demanda líquida média no horário de 12 horas, sendo esses horários escolhidos por motivos anteriormente citados, onde ambos os horários são analisados para o mês de julho de cada ano.

Figura 18 – Curva da demanda líquida média – com/sem geração distribuída mês de julho



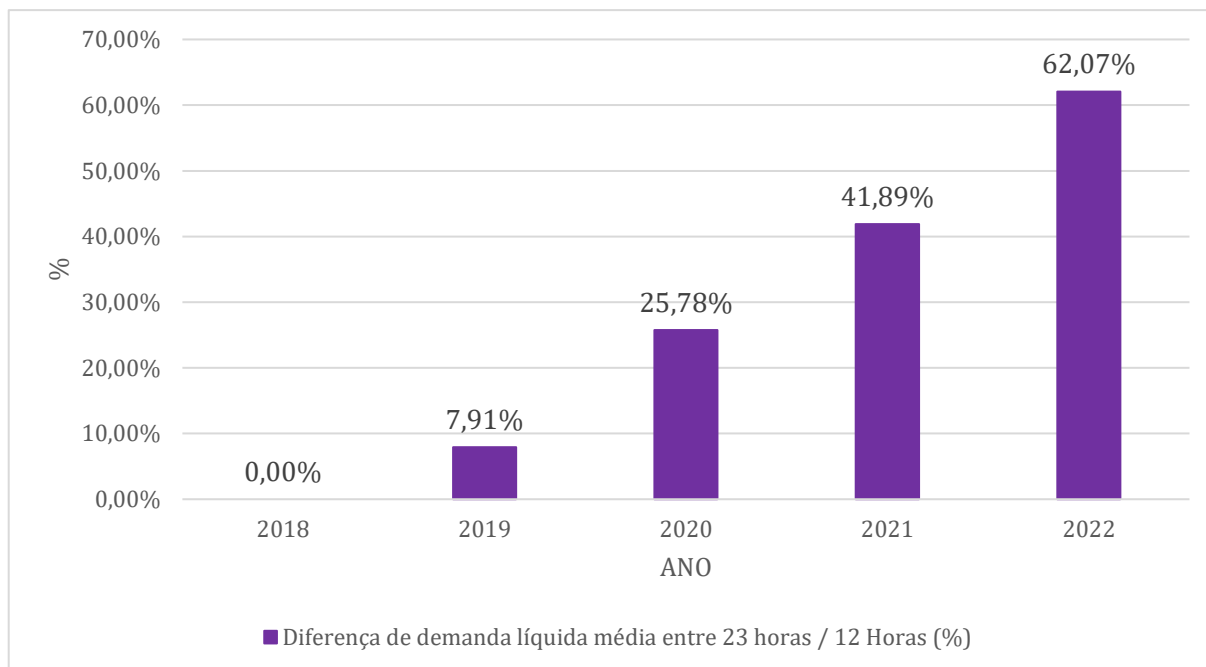
Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

Através da FIGURA 19, é possível relacionar o comportamento das curvas citadas, com o seguinte cenário: Inicialmente em 2018, quando a GD estava começando a avançar, ao comparar a demanda líquida média entre os dados da curva projetada de 12 horas e a curva real de 12 horas (dados medidos), durante o mês de julho se mantém em uma certa proporção. No ano de 2019, percebe-se que se iniciou o “deslocamento” entre a curva projetada de demanda líquida média do horário de 12 horas, com a real, acarretando o início do aumento da diferença, equivalente a 7,91%. Em 2020, o cenário intensificou-se ainda mais, com a entrada de mais conexões e a diferença entre a curva real da demanda líquida de 12 horas, e a curva projetada de

12 horas passou a ser de 25,78%. Relacionado a 2021, a diferença aumentou para 41,89%, e finalizando a curva em 2022, a diferença subiu para 62,07%.

Para sintetizar a explicação anterior, a FIGURA 17 concede dados referentes a relação da demanda líquida média entre os horários de 12 horas de forma projetada, e de 12 horas de forma real (medida), com o passar dos anos.

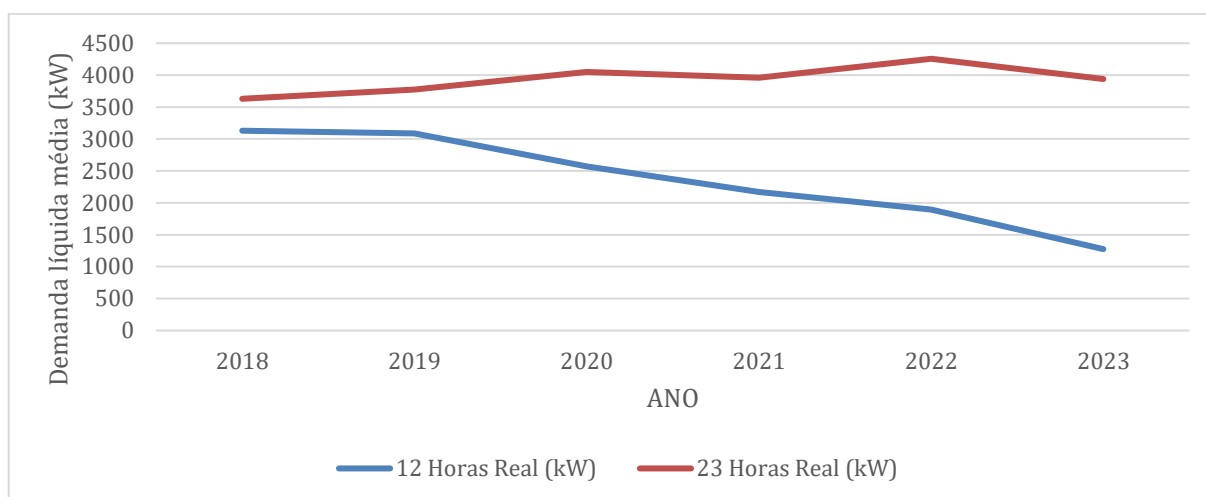
Figura 19 – Dados comparativos entre a demanda líquida média projetada e real - Anual



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

Partindo para uma análise anual, a FIGURA 20 é composta por duas curvas, onde a de cor vermelha se refere a demanda líquida média do horário de 23 horas, e a curva de cor azul, ao horário de 12 horas, ambas para o período entre 2018 e 2023. É importante destacar que os horários abordados são pautados no fato de que 23 horas corresponde ao horário de maior demanda líquida média no alimentador estudado, e 12 horas corresponde ao horário de pico da geração distribuída fotovoltaica, conforme expresso anteriormente.

Figura 20 – Curva da demanda líquida média entre 23 horas e 12 horas - Anual



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

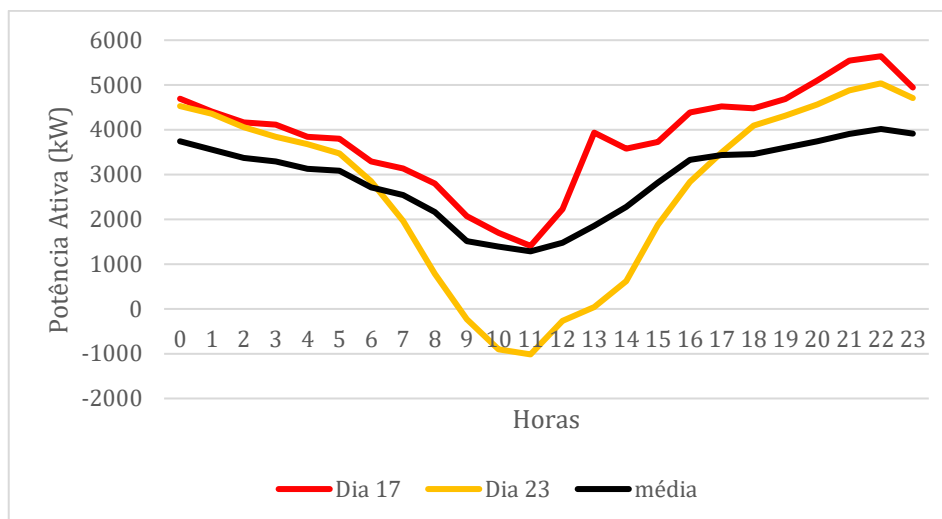
Com essas curvas é possível identificar que ao passar dos anos e com o aumento das conexões fotovoltaica em horário de seu pico (12 horas), junto às demais gerações distribuídas, fez com que a demanda líquida média de tal alimentador diminuísse ao longo dos anos, visto que, com o passar do tempo, a GD passou a se tornar cada vez mais expressiva.

4.4.5 FLUXO REVERSO

A bidirecionalidade ou fluxo reverso refere-se à capacidade de um sistema elétrico de permitir o fluxo de energia em ambas as direções, tanto no sentido fonte-carga como no carga-fonte. Em sistemas tradicionais, a eletricidade flui de forma unidirecional, geralmente da estação geradora para os consumidores. Contudo, com a introdução crescente de fontes de energia renovável, os sistemas elétricos estão enfrentando um aumento na bidirecionalidade, o que pode criar desafios específicos, incluindo o risco de queima inesperada de fusíveis devido ao fluxo reverso.

Com a bidirecionalidade, especialmente em sistemas que integram energia solar fotovoltaica, a eletricidade pode fluir de volta para a rede quando a produção local excede a demanda criando um cenário em que o fluxo de corrente pode ser invertido, indo contra a direção usual, conforme visto na FIGURA 21.

Figura 21 – Comparativo entre curvas de carga do mês 04/2023



Fonte: Feito pelos autores com dados da concessionária local (2024)

Para essa comparação foram analisadas todas as curvas do mês 04/2023, com o intuito de apresentar três curvas distintas. Uma delas representando o dia 17/04/2023, que registrou a maior demanda do mês. A segunda curva é do dia 23/04/2023, evidenciando o maior fluxo reverso do mês. Por fim, há a curva média de todos os dias do mês.

No dia 17 (segunda-feira), a curva revela a maior demanda do mês, atingindo 5,64 MW às 22 horas, que geralmente é o horário de pico para o alimentador estudado. No entanto, ao longo do dia, não foi observado nenhum fluxo reverso. Por outro lado, no dia 23 (domingo), embora a demanda máxima tenha alcançado 5 MW às 22 horas, durante o dia houve um fluxo reverso de 1 MW às 11 horas da manhã.

Uma das principais razões para essa disparidade reside no dia da semana. O estudo de caso demonstrou que o fluxo reverso era mais comum nos fins de semana e feriados, apesar de as temperaturas serem semelhantes em ambos os dias analisados.

A curva média, por sua vez, mostra que, embora alguns dias apresentem fluxo reverso ao longo do mês, isso não foi suficiente para inverter o padrão geral da curva mensal.

Com isso, a geração distribuída, especialmente por meio de sistemas fotovoltaicos instalados em telhados de residências e estabelecimentos comerciais, desempenha um papel significativo na criação de uma rede bidirecional. Durante momentos de grande produção solar e baixa demanda, o excedente de energia pode

ser devolvido à rede elétrica. Isso, por sua vez, coloca desafios adicionais para os dispositivos de proteção existentes, que precisam lidar com essa dinâmica de fluxo de energia em duas direções.

5 CONCLUSÃO

A geração distribuída fotovoltaica está transformando a paisagem das redes de distribuição de média tensão. A análise detalhada dessa integração na rede elétrica de Palmas (capital do Tocantins), revela diversos impactos e desafios. Inicialmente, o crescimento de 21.000% na quantidade de consumidores com GD instalada resultando em um significativo aumento na potência instalada, indo de 16 kW em 2018, para aproximadamente 6,3 MW em 2023. Esse incremento não apenas alterou a dinâmica de consumo, mas também introduziu flutuações na geração de energia devido à natureza intermitente da geração solar, conforme visto na FIGURA 11.

As flutuações na geração solar introduzem desafios na estabilidade e controle da rede elétrica, afetando o fator de potência em 0,6 pu no período de funcionamento da GD e dificultando a regulação de tensão. Além disso, durante períodos de alta geração solar, como observado em meses com menos chuvas, há uma redução na demanda líquida média nos horários de pico, enquanto em meses chuvosos, essa contribuição é menos significativa devido não haver quantidade expressiva de penetração de GD no sistema.

Além disso, a bidirecionalidade da energia — o fluxo reverso — representa um desafio adicional para a rede elétrica, especialmente em sistemas tradicionalmente unidirecionais. Isso requer adaptações nos dispositivos de proteção e controle de tensão para lidar com a energia que flui tanto da rede para os consumidores quanto vice-versa, conforme visto no dia 23/04/2023 e relatado na FIGURA 21, onde houve um fluxo reverso de 1 MW às 11 horas da manhã.

Com a incorporação crescente da GD fotovoltaica em Palmas, é demonstrado um avanço rumo à sustentabilidade energética, reduzindo perdas de transmissão e diminuindo a necessidade de investimentos em infraestrutura de rede. No entanto, esses benefícios vêm acompanhados de desafios técnicos significativos, como a regulação de tensão e o gerenciamento do fluxo reverso de energia.

Para enfrentar esses desafios, são necessárias soluções inovadoras, como sistemas de armazenamento de energia, reguladores de tensão avançados e tecnologias de previsão de geração solar. Além disso, políticas regulatórias adaptadas são cruciais para garantir a estabilidade e a eficiência operacional da rede elétrica em um cenário de crescimento contínuo.

É fundamental destacar que este estudo oferece recomendações para pesquisas futuras, como a mitigação dos impactos mencionados, análises sobre os efeitos na estabilidade, considerações econômicas e viabilidade técnica na implementação de novos dispositivos inteligentes na rede, além de investigações ambientais relacionadas à geração distribuída, como a redução das emissões de CO₂ e seu impacto nas mudanças climáticas.

Em resumo, os incentivos governamentais fizeram com que a GD despontasse como uma nova possibilidade de exploração do mercado de energia, e com a alteração da premissa de operação dos sistemas de distribuição, originalmente concebidos para operação de forma radial, com apenas uma fonte e um sentido para o fluxo de potência, é a principal razão a que se atribuem os impactos ocasionados à proteção contra faltas. Essa influência será tanto maior quanto maior for à penetração da GD no sistema.

6 REFERÊNCIAS

ABREU, F. B.; SILVA K. L. F. **Uma análise do Parque Cesamar, em Palmas (TO) sob o viés da biofilia**: compreendendo o seu estado da arte e sua aplicação no planejamento das cidades biofílicas. *Revista Brasileira de Ecoturismo*, v.12, n.5, pp.772-803, São Paulo. Acesso em: 20 jul. 2023.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (org.). **Infográfico ABSOLAR**. 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

AF Notícias. **Energisa moderniza sistema elétrico de Palmas e impulsiona desenvolvimento sustentável**. 2021. Disponível em: <[https://afnoticias.com.br/estado/energisa-moderniza-sistema-eletrico-de-palmas-e-impulsiona-desenvolvimento-sustentavel#:~:text=Palmas%20%C3%A9%20atendida%20por%20uma,e%20Taquaru%C3%A7u\)%20e%2037%20alimentadores](https://afnoticias.com.br/estado/energisa-moderniza-sistema-eletrico-de-palmas-e-impulsiona-desenvolvimento-sustentavel#:~:text=Palmas%20%C3%A9%20atendida%20por%20uma,e%20Taquaru%C3%A7u)%20e%2037%20alimentadores)>. Acesso em: 07 jun. 2024.

ALBUQUERQUE, Thiago Carrano *et al.* UM LEVANTAMENTO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL SOBRE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s. l], v. 6, n. 5, p. 915-939, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/51334/pdf>>. Acesso em: 17 out. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **BI Geração Distribuída**. 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojY2VmMmUwN2Q0YWFjOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 15 out. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **Micro e Minigeração Distribuída**. 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 23 out. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **Redes e linhas de distribuição**, 2010.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. 2012. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 26 ago. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015**. 2015. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 06 ago. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (org.). **Sobre Bandeiras Tarifárias**: Bandeiras tarifárias é o Sistema que sinaliza aos consumidores os custos reais da geração de energia elétrica. 2022b. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 12 set. 2023.

CIMA, Fernando Monteiro. **UTILIZAÇÃO DE INDICADORES ENERGÉTICOS NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO**. 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em:

<https://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Fernando_Monteiro_Cima.pdf>. Acesso em: 27 out. 2023.

COLUNA DO CT (Tocantins) (org.). **Energisa Tocantins é eleita uma das melhores distribuidoras de energia das regiões Norte e Centro-Oeste do País**. 2023. Disponível em: <<https://clebertoledo.com.br/tocantins/energisa-tocantins-e-eleita-uma-das-melhores-distribuidoras-de-energia-das-regioes-norte-e-centro-oeste-do-pais/>>. Acesso em: 20 mar. 2024.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **ENERGIA SOLAR: princípios e aplicações**, 2006. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf>. Acesso em: 21 out. 2023.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição Especial. PRC – PRODEEM 2004. Rio de Janeiro, 1999.

DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S/A (Tocantins) (org.). Resultados 2023. 2024. Disponível em: <<https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/4f2a784c-ba98-43a1-afbc-8a95901b4ce7/6aa5e599-e63f-b8d2-474a-5ad652d8b3fe?origin=1>>. Acesso em: 21 mar. 2024.

DANTAS, Stefano Giacomazzi; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. **VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL E POSSÍVEIS EFEITOS NO SETOR ELÉTRICO**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2018. 42 p. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_2388.pdf>. Acesso em: 22 out. 2023.

DARGHOUTH, N. R. et al. **Net metering and market feedback loops: Exploring the impact of retail rate design on distributed PV deployment**. Applied Energy, 1487701795, v. 162, p. 713-722, Jan 2016.

DIAS, Marcos Vinícius Xavier. **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL: oportunidades e barreiras**. 2005. 143 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2560/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_200529506.pdf>. Acesso em: 27 out. 2023.

DJAMBOLAKDJIAN, Gustavo Scherer. **Análise dos Impactos Técnicos da Geração Distribuída em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão**. 2022. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Gestão de Energia, Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tramandaí, 2022. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183>>

[/239994/001142257.pdf?sequence=1&isAllowed=y>](#). Acesso em: 26 out. 2023.

ECO AQUECEDORES. **Energia solar fotovoltaica of gride**. 2020. Disponível em: <https://www.ecoaquecedores.com.br/energia-solar-fotovoltaica-off-grid/>> Acesso em: 22 fev. 2023.

ELETROBRAS. **Relatório de resultados do PROCEL 2021**: ano-base 2020. Rio de Janeiro: ELETROBRAS, 2020a.

ENERGES. **CONTRATAÇÃO DE DEMANDA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. 2023. Disponível em: <https://energes.com.br/demanda-contratada-gd/>>. Acesso em: 23 out. 2023.

ENERGIA HOJE. **SCEE – Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2023. Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/glossario/scee-sistema-de-compensacao-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 26 out. 2023.

ENTEC SOLAR BRASIL (Pará) (org.). **O QUE É UM MEDIDOR DE ENERGIA BIDIRECIONAL?** 2019. Disponível em: <https://entecsolarbelem.blogspot.com/2019/02/o-que-e-um-medidor-de-energia.html>>. Acesso em: 20 out. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisas Energética(org.). **Matriz Energética e Elétrica**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

FORTI, Matheus Luis. **ESTUDO DE CASO DA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA INDUSTRIAL**. 2017. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/2868/1/MatheusLuisForti.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.

FREITAS, S. S. A. **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos**. 2008. (Mestrado em Engenharia Industrial ramo Engenharia Eletrotécnica). Departamento de Eletrotécnica, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

FURTADO, André. **Desenvolvimento e Natureza, estudos para uma sociedade sustentável**: Opções Tecnológicas e o Desenvolvimento do Terceiro Mundo. Recife, 1994. Disponível em: <https://biblioteca-repositorio.clacso.edu.ar/bitstream/CLACSO/3543/1/cavalcanti1.pdf>>. Acesso em 29 out. 2023

G1 Tocantins (org.). **Palmas contabiliza 279 milímetros de chuva em fevereiro e supera média dos últimos 30 anos, aponta balanço**. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2023/03/10/palmas-contabiliza-279-milimetros-de-chuva-em-fevereiro-e-supera-media-dos-ultimos-30-anos-aponta-balanco.ghtml>>. Acesso em: 19 jun. 2024.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 2002.

HOSENUZZAMAN, M. et al. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**: global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. Elsevier, [s. l], p. 285-296, 21 jul. 2014. Disponível em: <<https://web.mit.edu/mission/www/m2018/pdfs/japan/photovoltaic-power.pdf>>. Acesso em: 18 set. 2023.

IRENA - International Renewable Energy Agency (org.). Alcançado crescimento recorde em energias renováveis apesar da crise energética. 2023. Disponível em: <<https://www.irena.org/News/pressreleases/2023/Mar/Record-Growth-in-Renewables-Achieved-Despite-Energy-Crisis-PT>>. Acesso em: 16 out. 2023.

KAGAN, Nelson. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Editora Blucher, 2005. E-book. ISBN 978-85-212-1689-6. Disponível em: <<https://integ.rada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521216896/>>. Acesso em: 03 set. 2023.

LEÃO, Ruth. GTD – **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2009. 37 f. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2009.

MALFA, Enrico. **ABB on Sustainable Energy Markets**. Università di Brescia, 2002.

MARTINS, Alexandre Saccol; BONAN, Guilherme; FLORES, Gustavo Ceretta. **Entendendo o fator de potência**. 2008. Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento – CP Eletrônica S.A., Porto Alegre, 2008.

MEGAWHAT (org.). **Geração Distribuída**. 2022. Disponível em: <<https://megawhat.energy/verbetes/332/geracao-distribuida>>. Acesso em: 14 out. 2023.

MEHL, Ewaldo L. M.. **Qualidade da Energia Elétrica**. 2000. Disponível em: <<http://eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2023.

MENEZES, Victor Prangiel de. **LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**: aspectos técnicos, orçamentários e construtivos. 2015. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10015383.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2023.

MILLER, D.; HOPE, C. **Learning to lend for off-grid solar power**: policy lessons from World Bank loans to India, Indonesia, and Sri Lanka. Energy Policy, 1487701795, v. 28, n. 2, p. 87-105, Feb 2000.

MIRANDA, Leila Mourão. Sobre história, sustentabilidade e crise energética. **Revista Brasileira de História**, [S.L.], v. 43, n. 92, p. 15-28, abr. 2023. FapUNIFESP (SciELO).

Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbh/a/jyPGVj8MZycHSjfY4XTBMcb/>>. Acesso em: 25 out. 2023.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org.); EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (org.). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME; EPE, 2007. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/documents/36208/468569/11.+Efici%C3%Aancia+Energ%C3%A9tica+%28PDF%29.pdf/e59fd613-db70-044f-dee5-d66a208cb3b5?version=1.0>>. Acesso em 01 nov. 2023

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org.). **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília: MME, 2011.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org.). **Portaria nº 538-2015**. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias/2015/portaria-n-538-2015.pdf/view>>. Acesso em: 14 out. 2023.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (org.). **RELATÓRIO**: Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica - ProGD. 2018. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/documents/20182/6dac9bf7-78c7-ff43-1f03-8a7322476a08>>. Acesso em: 20 out. 2023.

MOREIRA, José Roberto S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Disponível em: Minha Biblioteca, (2nd edição). Grupo GEN, 2021.

MUZY, Gustavo Luiz Castro de Oliveira. **Subestações Elétricas**. 2012. 122 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005233.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2023.

NOGUEIRA, Maria Jozeane. **O PROCESSO DE REGULARIZAÇÃO FUNDIÁRIA NA PERIFERIA DE PALMAS - TO: O CASO DOS SETORES SANTO AMARO I, II E LAGO NORTE**. 2017. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/595/1/Maria%20Jozeane%20Noqueira%20-%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2023.

OCA ENERGIA. **Quais são os componentes de um sistema fotovoltaico?**. 2020. Disponível em: <<https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/quais-sao-os-componentes-sistema-fotovoltaico/#:~:text=Em%20suma%2C%20os%20principais%20componetes,controladores%20de%20carga%20e%20baterias>>. Acesso em: 22 out. 2023.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (org.). **Energia Agora: Carga e Geração**. 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>>. Acesso em: 07 jun. 2024.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (org.). **O QUE É ONS**. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (org.). **O QUE É O SIN: o sistema interligado nacional**. 2018. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 10 set. 2023.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (org.). **RELATÓRIO DA ADMINISTRAÇÃO E AS DEMONSTRAÇÕES FINANCEIRAS**. 2015. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/2015-ONS-Relatorio-Anual.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2023.

PALMAS (Município). **Decreto Municipal Nº 1220, de 28 de Março de 2016**. 2016. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=317973>>. Acesso em: 27 out. 2023.

PALMAS (Município). **Lei Complementar Nº 327, de 24 de Novembro de 2015**. 2015. Disponível em: <<https://legislativo.palmas.to.gov.br/media/leis/lei-complementar-327-2015-11-24-4-4-2019-12-46-18.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2023.

PEREIRA, E. B. MARTINS, F. R. ABREU, S. L. RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar (ABES)**. 2ª ed. São Jose dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.15.18.20/doc/thisInformationItemHomePage.html>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

PETERS, Glen P.; HERTWICH, Edgar G. **CO2 EMBODIED IN INTERNATIONAL TRADE WITH IMPLICATIONS FOR GLOBAL CLIMATE POLICY**. Acs Publications: Policy Analysis, [s. l], v. 42, n. 5, p. 1-7, 14 ago. 2007. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/es072023k>>. Acesso em: 20 out. 2023.

PIETROWSKI, Evandro Leal. **ANÁLISE DO IMPACTO DA MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO NÍVEL DE TENSÃO DE REDES PRIMÁRIAS DE DISTRIBUIÇÃO**: estudo de caso em concessionária de energia elétrica do rio grande do sul. 2022. 72 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Ritter dos Reis, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://repositorio.Animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/30523/1/2022_EvandroLealPietrowski.pdf>. Acesso em: 30 out. 2023.

PINTO, Milton de O. **Energia Elétrica - Geração, Transmissão e Sistemas Interligados**. Grupo GEN, 2013. E-book. ISBN 978-85-216-2526-1. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2526-1/>>. Acesso em: 03 set. 2023.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Sistemas Fotovoltaicos**. 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-sistemas-fotovoltaicos>> Acesso em: 22 fev. 2023.

PUCRIO - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (org.). RIO DE JANEIRO. **CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL – SIN**. 2007. Disponível em: <https://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0610776_08_cap_02.pdf> Acesso em: 19 out. 2023.

ResearchGate. **Mapa de localização de Palmas**. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-02-Mapa-de-localizacao-de-Palmas-Tocantins-Escala-150000_fig2_362802345. Acesso em: 21 nov. 2023.

RUDDY, Gabriela. **Passo a passo: como aderir à geração distribuída de energia**. 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/passo-a-passo-como-aderir-a-geracao-distribuida-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 20 ago. 2023.

SAIDEL, Marco. **Operação do SIN**: PEA3496. 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2876729/mod_resource/content/1/Opera%C3%A7%C3%A3o%20do%20SIN%202017.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2023.

SANTOS, Laura Lisiane Callai dos. **Metodologia para Análise da Tarifa Branca e da Geração Distribuída de Pequeno Porte nos Consumidores Residenciais de Baixa Tensão**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8535/SANTOS,%20LAURA%20LISIANE%20CALLAI%20DOS.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 21 out. 2023.

SEVERINO, Mauro Moura. **AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA ATENDIMENTO A COMUNIDADES ISOLADAS DA AMAZÔNIA**. 2008. 358 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/6902/1/2008_MauroMouraSeverino.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2024.

SILVA, Daniel Gomes da. **Integração entre as atividades de Planejamento e Operação em uma empresa de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-10122013-143832/publico/Dissertacao_Daniel_Gomes_unprotected.pdf>. Acesso em: 18 out. 2023.

TURKSON, J. & WOHLGEMUTH, N. "Power Sector Reform and Distributed Generation in sub-Saharan Africa" Energy Policy 29: 135 - 145, 2001.

VAN HAAREN, R., MORJARIA, M., FTHENAKIS, V. "Empirical assessment of short-term variability from utility-scale solar PV plants", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014.